

2-2024

FIRE and EXPLOSION
SAFETY

ПОЖАРОВЗРЫВО-

БЕЗОПАСНОСТЬ



НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКИЙ ЖУРНАЛ

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

ОРГАНИЗАЦИЯ УПРАВЛЕНИЯ
ПОЖАРНЫМИ ПОДРАЗДЕЛЕНИЯМИ
С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ СОВРЕМЕННОГО
ПОЖАРНО-СПАСАТЕЛЬНОГО ОБОРУДОВАНИЯ
ПРИ ТУШЕНИИ ПОЖАРОВ ВОЗДУШНЫХ СУДОВ



КОМПЛЕКСНАЯ БЕЗОПАСНОСТЬ

пожарная • промышленная • производственная • экологическая



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 24.04.2024.

Выход в свет 26.04.2024.

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, Ньютаунбпи, 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)

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, Университи-Парк, Пенсильвания, США)

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

СОДЕРЖАНИЕ

CONTENTS

ОБЩИЕ ВОПРОСЫ КОМПЛЕКСНОЙ БЕЗОПАСНОСТИ

GENERAL QUESTIONS OF COMPLEX SAFETY

А.С. БАРАНОВСКИЙ
Принципиальные проблемы применения расчета пожарного риска. Необходимость и возможности его оптимизации

5

A.S. BARANOVSKY
Fundamental problems of applying fire risk calculation. The necessity and possibilities of its optimization

ПРОЦЕССЫ ГОРЕНИЯ, ДЕТОНАЦИИ И ВЗРЫВА

COMBUSTION, DETONATION AND EXPLOSION PROCESSES

В.А. ГОРЕВ, Е.Ю. ЧЕЛЕКОВА, А.Д. КОРОЛЬЧЕНКО
Влияние заглубления легкосбрасываемых конструкций на формирование взрывной нагрузки

15

V.A. GOREV, E.Yu. CHELEKOVA, A.D. KOROLCHENKO
The effect of embedment depth of relief structures on explosive loading

Н.Л. ПОЛЕТАЕВ, М.С. САЗОНОВ, М.Ю. КОПТЕВ
Особенности взрыва антрацита в 20-л камере

23

N.L. POLETAEV, M.S. SAZONOV, M.Yu. KOPTEV
Anthracite dust explosion specificities in 20 L chamber

БЕЗОПАСНОСТЬ ВЕЩЕСТВ И МАТЕРИАЛОВ

SAFETY OF SUBSTANCES AND MATERIALS

Т.Ю. ЕРЕМИНА, С.В. УТКИН
Исследование изменений свойств огнезащитных покрытий интумесцентного типа методом термомеханического анализа

32

T.Yu. EREMINA, S.V. UTKIN
Study of changes in the properties of fire-retardant coatings of intumescent type by thermomechanical analysis method

МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ, ЧИСЛЕННЫЕ МЕТОДЫ И КОМПЛЕКСЫ ПРОГРАММ

MATHEMATICAL MODELING, NUMERICAL METHODS AND PROGRAM COMPLEXES

С.В. ПУЗАЧ, С.П. КАЛМЫКОВ
Численное моделирование задымления помещений при пожаре с учетом различных типов пожарной нагрузки

42

S.V. PUZACH, S.P. KALMYKOV
Numerical modelling of smoke condition of premises in case of fire taking into account different types of fire load

БЕЗОПАСНОСТЬ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ И ОБОРУДОВАНИЯ

SAFETY OF TECHNOLOGICAL PROCESSES AND EQUIPMENT

Ю.Н. ШЕБЕКО
Особенности поведения резервуаров с сжиженным водородом в очаге пожара

50

Yu.N. SHEBEKO
Behavior of compressed and liquefied hydrogen tanks in a fire zone

АВТОМАТИЗИРОВАННЫЕ СИСТЕМЫ И СРЕДСТВА

AUTOMATED SYSTEMS AND MEANS

Л.Т. ТАНКЛЕВСКИЙ, А.А. ТАРАНЦЕВ, И.Д. БАЛАБАНОВ
Моделирование процесса эксплуатации систем противопожарной защиты с использованием марковских цепей

59

L.T. TANKLEVSKIY, A.A. TARANTSEV, I.D. BALABANOV
Modelling the operation process of fire protection systems using Markov chains

С.А. ЕРМАКОВ, В.В. ДИМИТРИУК, С.М. ЖДАНОВ, А.А. ФАДЕЕВ
Вопрос о перспективах развития интеллектуальных пожарных извещателей

68

S.A. ERMAKOV, V.V. DIMITRYUK, S.M. ZHDANOV, A.A. FADEEV
Prospects for development of intelligent fire detectors

СРЕДСТВА И СПОСОБЫ ТУШЕНИЯ ПОЖАРОВ

MEANS AND WAYS OF FIRE EXTINGUISHING

В.В. КРЫМСКИЙ, В.Р. ГОЛОВЕНКО
Организация управления пожарными подразделениями с использованием современного пожарно-спасательного оборудования при тушении пожаров воздушных судов

77

V.V. KRYMSKY, V.R. GOLOVENKO
Organization of management of firefighting units with the use of modern fire and rescue equipment when extinguishing aircraft fires

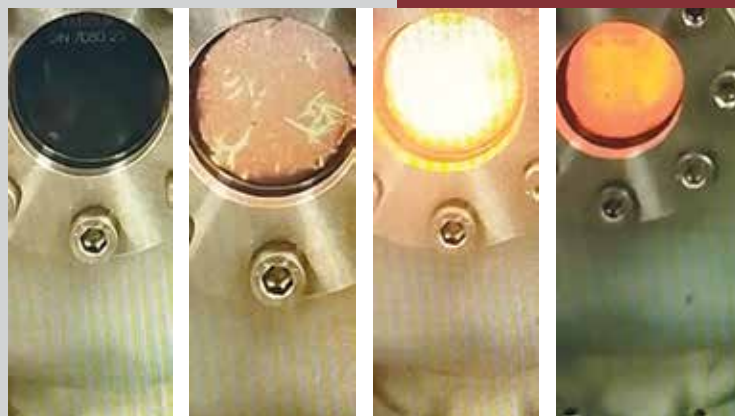
ОСНОВНАЯ ЦЕЛЬ ЖУРНАЛА —
ознакомление международного сообщества
с результатами исследований, проводимых
российскими и зарубежными учеными
в области комплексной безопасности.

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.



Заглубление легкосбрасываемых конструкций и взрыв

Стр. 15



Стр. 23

Особенности взрыва антрацита в 20-л камере



Моделирование задымления помещений при пожаре

Стр. 42



Стр. 59

Моделирование систем противопожарной защиты

Стр. 77



Управление пожарными при тушении пожаров воздушных судов



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 24.04.2024.
Date of publication 26.04.2024.
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)

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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. 2024. Т. 33. № 2. С. 5–14
POZHAROVZRYVOBEZOPASNOST/FIRE AND EXPLOSION SAFETY. 2024; 33(2):5-14

НАУЧНАЯ СТАТЬЯ/RESEARCH PAPER

УДК 614.84

<https://doi.org/10.22227/0869-7493.2024.33.02.5-14>

Принципиальные проблемы применения расчета пожарного риска. Необходимость и возможности его оптимизации

Алексей Сергеевич Барановский ✉

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. В последние годы в области пожарной безопасности большое внимание уделяется риск-ориентированному подходу и, в частности, широкое применение получил расчет пожарного риска. Значительно усложнились подходы и методы таких расчетов. Однако наличие ряда проблем говорит о необходимости ограничения применения расчета пожарного риска и его оптимизации с учетом сложившихся реалий практического применения.

Цели и задачи. Целью статьи является выявление существующих проблем при расчете пожарного риска и их влияния на результаты подобных расчетов, в том числе на корректность и возможность применения проектных решений, которые они обосновывают. Кроме того, одной из задач является поиск путей оптимизации и упрощения расчета для возможности уменьшения временных и материальных затрат на его выполнение, качественной проверки контролирующими органами при сохранении необходимой точности инженерной оценки.

Основная часть. Рассмотрены нормативные основания и предпосылки возникновения расчетных методов по оценке пожарного риска. Описаны существующие проблемы современного применения таких расчетов, включая несоответствия и перекосы в нормативном поле, отсутствие необходимых элементов соответствия понятию корректной оценки (погрешность результата, отсутствие правил в области программных продуктов и квалификации специалистов и т.п.), отсутствие возможности проверки и, как следствие, невозможность оценки правильности принятых в соответствии с расчетом проектных решений. Предложены подходы по оптимизации проведения расчетов. Описана модель эвакуации людей и протестирована компьютерная программа по ее реализации. Выполнен расчет модельного объекта.

Выводы. Описанные в настоящей работе проблемы свидетельствуют о значительном несовершенстве инструмента расчета пожарного риска, что, в свою очередь, не позволяет применять его для обоснования многих проектных решений, которые в настоящее время обосновываются таким расчетом. При этом соответствующие расчетные методики должны развиваться не только по пути усложнения, но и иметь возможность оптимизации с точки зрения практического применения и проверки результатов расчета. Кроме того, с учетом сложившейся ситуации естественной является необходимость ограничения ее применения для ряда случаев, по крайней мере, пока не будет достигнута необходимая точность, либо не будут разработаны соответствующие правовые механизмы, позволяющие пренебречь наличием большой погрешности и регулирующие сферу применения методик, программного обеспечения и работу соответствующих специалистов.

Ключевые слова: риск-ориентированный подход; моделирование пожара; эвакуация людей; расчетная оценка; нормативные требования

Для цитирования: Барановский А.С. Принципиальные проблемы применения расчета пожарного риска. Необходимость и возможности его оптимизации // Пожаровзрывобезопасность/Fire and Explosion Safety. 2024. Т. 33. № 2. С. 5–14. DOI: 10.22227/0869-7493.2024.33.02.5-14

✉ Барановский Алексей Сергеевич, e-mail: komnata110@yandex.ru

Fundamental problems of applying fire risk calculation. The necessity and possibilities of its optimization

Alexey S. Baranovsky ✉

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

ABSTRACT

Introduction. In recent years, much attention has been paid to the risk-based approach in the field of fire safety and, in particular, the calculation of fire risk has been widely used. The approaches and methods of such calcu-

lations have become considerably more complicated. However, the presence of a number of problems indicates the need to limit the use of fire risk calculation and optimize it, taking into account the prevailing realities of practical application.

Goals and objectives. The purpose of the paper is to identify existing problems in the calculation of fire risk and their impact on the results of such calculations, including the correctness and possibility of applying design solutions that they justify. In addition, one of the tasks is to find ways to optimize and simplify the calculation in order to reduce the time and material costs of its implementation, high-quality verification by regulatory authorities while maintaining the necessary accuracy of the engineering assessment.

The main part. The normative bases and prerequisites for the emergence of computational methods for assessing fire risk are considered. The existing problems of modern application of such calculations are described, including inconsistencies and distortions in the regulatory field, the lack of necessary elements of compliance with the concept of correct assessment (result error, lack of rules in the field of software products and qualifications of specialists, etc.), the lack of verification and, as a result, the inability to assess the correctness of design decisions made in accordance with the calculation. Approaches for optimization of calculations are proposed. A model of evacuation of people is described and a computer programme for its implementation is tested. The calculation of the model object is performed.

Conclusions. The problems described in this paper indicate a significant imperfection of the fire risk calculation tool, which, in turn, does not allow it to be used to justify many design solutions that are currently justified by such a calculation. At the same time, the corresponding calculation methods should develop not only along the path of complication, but also have the possibility of optimization in terms of practical application and verification of calculation results. In addition, taking into account the current situation, it is natural to limit its application for a number of cases, at least until the necessary accuracy is achieved, or appropriate legal mechanisms are developed that allow neglecting the presence of a large error and regulating the scope of application of techniques, software and the work of relevant specialists.

Keywords: risk-based approach; fire modelling; evacuation of people; computational assessment; regulatory requirements

For citation: Baranovsky A.S. Fundamental problems of applying fire risk calculation. The necessity and possibilities of its optimization. *Pozharovzryvobezopasnost/Fire and Explosion Safety*. 2024; 33(2):5-14. DOI: 10.22227/0869-7493.2024.33.02.5-14 (rus).

✉ Alexey Sergeevich Baranovsky, e-mail: komnata110@yandex.ru

Введение

В последние годы в области пожарной безопасности большое внимание уделяется риск-ориентированному подходу, развитие которого фактически закреплено на законодательном уровне [1]. В свою очередь, значительная часть этого подхода так или иначе касается расчета пожарного риска. Методика этого расчета для общественных зданий [2] (далее — Методика) уже претерпела несколько редакций. При этом большинство специалистов, как правило, говорят о необходимости дальнейшего развития, совершенствования и усложнения методов расчета пожарного риска. По крайней мере, такая тенденция прослеживается даже при поверхностном анализе изменений Методики.

Тем не менее в настоящей работе затронута тема необходимости ограничения применения и оптимизации этих расчетов, под которой подразумевается их упрощение, с учетом текущей ситуации в этой области, связанной не только с проведением расчета, но и с необходимостью оценки его адекватности, а также адекватности проектных решений, которые обосновываются этим расчетом. Несмотря на многообразие работ, посвященных теме пожарного риска ([3–5] и др.), указанная проблема затрагивается достаточно редко.

Состояние вопроса. Проблемы использования расчета риска

В настоящее время расчетная оценка пожарного риска для объектов различного назначения имеет непомерно высокий статус, определяемый ст. 6 Федерального закона [6] (далее — ФЗ-123), являясь одним из условий подтверждения (обеспечения) пожарной безопасности объекта защиты. Почему непомерно?

Поскольку формально в законе заложена прогрессивная идея в плане гибкости подхода к обеспечению пожарной безопасности, ориентированная не на жесткое соблюдение норм, а на возможное фактическое значение уровня риска. Однако в настоящее время реализовать ее в полном объеме с помощью существующих методов не представляется возможным. А те проектные решения, которые возможно подтвердить, используя расчетные методы, это лишь малая незначительная часть, если рассматривать полный комплекс нормативных требований в области пожарной безопасности. Поэтому в текущем виде, к тому же если рассматривать совместно п. 2 и п. 5 ч. 1 ст. 6 [6], что вполне логично, использование расчетных оценок это лишь способ невыполнения (ухода) от тех или иных нормативных требований, которые, конечно, в ряде случаев действительно очень несовершенны.

Приведенное утверждение является справедливым, поскольку возможности методов определения величины риска крайне ограничены.

Однако концепция ст. 6 присутствует в ФЗ-123 [6] с момента его создания. Тем самым федеральный закон задал хороший импульс к появлению и развитию соответствующих расчетных методов и методик. Хотя на настоящий момент официально утвержденными являются только методики расчета пожарного риска для общественных [2] и производственных зданий [7].

Необходимо отметить, что расчетная оценка уровня обеспечения пожарной безопасности людей появилась достаточно давно [8], однако не имела такого высокого статуса и использовалась достаточно редко для тех целей, для которых сейчас используют расчет пожарного риска, поскольку основным ориентиром, как правило, являлось выполнение нормативных требований.

Очевидно, что со времени действия ГОСТа [8] в области методов расчета риска все значительно усложнилось. Появились дополнительные модели расчета, оценка влияния различных систем противопожарной защиты и т.п. (табл. 1).

Однако необходимо задаться вопросом: расчет ли это? И анализируя основные положения расчетной методики [2] и опыт деятельности в указанной сфере, можно ответить, что это не расчет, а *расчетная оценка*.

В самом деле, расчет обычно должен иметь математическую строгость, точный численный результат, а при наличии исходных данных, носящих вероятностный характер, также оценку погрешности результата.

С точки зрения описания моделей все обстоит достаточно хорошо. С определением погрешности полученного результата — наоборот. А именно погрешность расчета как таковая не определяется в принципе. Здесь можно упомянуть известный ролик¹, в котором профессор И.М. Абдурагимов рассуждает о погрешности расчета риска, и его же статью [9]. Но даже без этих совершенно справедливых доводов можно сказать, что погрешность подобных расчетов на уровне 50 % считается отличным результатом.

Если же говорить не только о Методике, а включить сюда весь процесс процедуры расчета с обоснованием тех или иных отступлений, то можно выделить целый ряд проблем, ставящих под серьезное сомнение правильность и адекватность результатов подобных расчетов (табл. 2):

- существенная погрешность исходных данных;

¹ Абдурагимов И.М. О расчете индивидуального пожарного риска. URL: <https://ya.ru/video/preview/16163247392728694303> (дата обращения: 01.11.2023).

Таблица 1. Сравнение основных особенностей Методики расчета пожарного риска и положений ГОСТ

Table 1. Comparison of the main features of the Fire Risk Calculation Methodology and the provisions of GOST

Методика № 1140 Methodology No. 1140	ГОСТ GOST
• 3 модели расчета ОФП и эвакуации 3 models for calculating fire hazards and evacuation • Расширенная оценка влияния систем ПЗ Extended assessment of the impact of fire protection systems • Определение времени срабатывания систем Determining the response time of the systems • Ограничения применения расчетных методик Limitations of the use of calculation methods • Максимально подробное описание параметров эвакуации людей и т.д. The most detailed description of the parameters of evacuation of people, etc.	1 модель пожара и эвакуации 1 model of fire and evacuation

Таблица 2. Программная реализация методики расчета
Table 2. Software implementation of the calculation method

Требование к программному продукту Software product requirement	Наличие/отсутствие Availability/absence
Сертификация Certification	Отсутствует Absent
Требования к верификации Verification requirements	Отсутствуют Absent
Требования к валидации Validation requirements	Отсутствуют Absent
Аттестация специалистов Certification of specialists	Отсутствует Absent

- возможность различной интерпретации результатов расчета;
- вопросы, связанные с использованием программного обеспечения и квалификации специалистов и т.д.

Как следует из вышеизложенного, отсутствует и фактическая ответственность за представленный результат, поскольку, используя перечисленные недостатки, при желании может быть получен любой «правильный» результат.

Описывая данную проблему, не следует забывать о высоком статусе расчета пожарного риска (регламентирован ФЗ-123 [6]), о котором было сказано выше. А именно о возможности на основании результатов этого расчета отказаться от тех или иных нормативных требований, выработанных годами. И одно дело, когда речь идет о некоторой

корректировке численных значений какой-либо нормы в рамках расчета, и совсем другое, когда речь идет о ее полной отмене.

В дополнение к этому следует упомянуть о необходимости оценки адекватности расчета пожарного риска органами госпожнадзора и экспертизы. Причем в данном случае имеется в виду не только техническая оценка проведения расчета (правильность задания исходных данных, выбор сценариев пожара, характеристик веществ и материалов и т.д.), но и принципиальная возможность его выполнения для обоснования тех или иных отступлений от требований норм. Ведь эти вопросы довольно часто поднимаются на практике, и, зачастую, не имеют однозначного ответа.

Однако при всей сложности существующей нормативно-технической системы (сложность и отсутствие единых стандартов расчета, постоянно меняющиеся требования норм, применение специальных технических условий, неясности в правовом поле и т.д.) ни о какой нормальной проверке не может идти речи. Максимум, что может быть сделано — проведена проверка исходных данных или заданы новые сценарии расчета, что, собственно, и отражали в части госпожнадзора требования уже отмененного административного регламента [10], которые почти в неизменном виде были перенесены в [11]. При этом очевидно, что проверка только правильности исходных данных не является полноценной проверкой адекватности всего расчета, а составляет лишь ее незначительную часть.

В этой ситуации неоправданно высокий статус расчетной оценки пожарного риска выглядит очень сомнительным, если не сказать неверным.

Однако, по факту в настоящее время расчет пожарного риска — это один из видов бизнеса в области пожарной безопасности, который активно развивается, несмотря на все вышеперечисленные недостатки. Официальные данные по количеству проведенных расчетов в настоящее время отсутствуют, но частично их можно оценить по косвенным признакам (рис. 1). В частности, количество решений о непринятии расчета пожарного риска в 2022 г. составляет около 500. Если в качестве грубой оценки предположить, что это около четверти всех решений, то количество поданных расчетов риска составит около двух тысяч. Если добавить сюда расчеты риска, разрабатываемые в рамках СТУ, а это около трех тысяч, то общее количество указанных расчетов составит внушительную цифру — около пяти тысяч!

С учетом вышеизложенных недостатков все-таки необходимо отметить, что речь не идет о том, что нужно запретить или остановить развитие расчетных методов. Наоборот, их развитие и использование является необходимым. Однако при этом такое



Рис. 1. Решения о непринятии расчета пожарных рисков в 2022 г.

Fig. 1. Decisions not to accept the calculation of fire risks in 2022

использование должно быть адекватным с точки зрения поставленных задач и своих реальных возможностей. А главное, иметь возможность объективного контроля (пусть и не всеобъемлющего) не только в части задания исходных данных или оформления расчетов.

В противном случае при наличии вышеописанных проблем возможность обоснования указанными расчетами тех или иных проектных решений должна быть серьезно ограничена. Такая попытка в свое время была предпринята во ВНИИПО в виде ограничения применения расчетов для обоснования отступлений от требований норм в рамках самих нормативных документов, либо в рамках Методики. Однако она не получила соответствующей поддержки и не была реализована.

Возможность оптимизации расчетов

Как было отмечено выше, расчетная оценка обеспечения безопасной эвакуации людей при пожаре использовалась и ранее в рамках ГОСТ [8]. Однако такие расчеты по большей части могли осуществляться фактически неподготовленными специалистами-проектировщиками в соответствии с достаточно простой методикой. Напротив, сейчас мы имеем дело с настолько усложнившимися методами, что большинство данных специалистов не в состоянии ни корректно провести расчет, ни интерпретировать результат, ни проверить его.

Данное утверждение совсем не означает, что нужно полностью вернуться к методам расчета ГОСТа 30-летней давности. Но если провести анализ объектов или нарушений, для которых используется расчет риска, то будет ясно, что не так уж много из указанных случаев нуждаются в применении таких «тяжеловесных» методов.

В частности, сюда можно отнести так называемые «стандартные» объекты, а не геометрически сложные многосветные пространства, независимые функциональные объемы и т.п. Это, как правило, офисные помещения, жилые здания, социальные объекты, гостиницы и т.д.

Ко второму типу «стандартных» объектов относятся объекты, имеющие в соответствии с технологией использования большие объемы помещений и малое количество людей. «Специалисты» с удовольствием берутся за проведение расчета для подобных зданий, поскольку и без расчета очевидно, что даже при наличии достаточно серьезных нарушений критерий обеспечения безопасности будет обеспечен. Таким образом, все риски в данном случае переходят в правовую плоскость, связанную с причинением материального ущерба. То есть проведение расчета сводится к простой формальности.

Понятно, что выполнение расчетной оценки не повредит и в этом случае. Однако если идет речь о применении более простых методов там, где это возможно, а также возможности адекватной проверки контролирующими лицами, то в оптимизации таких расчетов есть немалый смысл. Кроме того, такие расчеты будут полностью соответствовать термину «расчетная оценка».

Итак, к возможностям по оптимизации расчетной оценки пожарного риска могут быть отнесены.

1. *Расширение области применения интегральных методов.* Общие интегральные модели пожара были сформулированы достаточно давно как в нашей стране ([12, 13] и др.), так и за рубежом [14, 15]. Основные зависимости для определения критической продолжительности для соответствующих опасных факторов пожара (соответственно, температура, потеря видимости, пониженное содержание кислорода, газообразные токсичные продукты горения) представлены ниже.

$$t_{кр}^t = \left\{ \frac{B}{A} \cdot \ln \left[1 + \frac{70 - t_0}{(273 + t_0) \cdot z} \right] \right\}^{1/n}; \quad (1)$$

$$t_{кр}^{п.в} = \left\{ \frac{B}{A} \cdot \ln \left[1 - \frac{V \cdot \ln(1,05 \cdot \alpha \cdot E)}{l_{пр} \cdot B \cdot D_m \cdot z} \right]^{-1} \right\}^{1/n}; \quad (2)$$

$$t_{кр}^{O_2} = \left\{ \frac{B}{A} \cdot \ln \left[1 - \frac{0,044}{\left(\frac{B \cdot L_{O_2}}{V} + 0,27 \right) \cdot z} \right]^{-1} \right\}^{1/n}; \quad (3)$$

$$t_{кр}^{т.г} = \left\{ \frac{B}{A} \cdot \ln \left[1 - \frac{V \cdot X}{B \cdot L \cdot z} \right]^{-1} \right\}^{1/n}. \quad (4)$$

Сейчас область применения данного метода постоянно сужается. Но во многих случаях он дает более «жесткие» результаты по сравнению с другими моде-

лями как в вариантах применения в соответствии с рекомендациями Методики, так и в иных случаях.

Если же критерий выполняется даже при получении такого «жесткого» результата, то применение более сложных методов не является оправданным. Кроме того, при необходимости могут быть введены дополнительные коэффициенты надежности, которые и сейчас используются в Методике [2], но могут быть уменьшены при соответствующем обосновании.

В качестве примера может быть представлен расчет модельного объекта: этаж здания коридорного типа с шириной и длиной коридора 2 и 30 м соответственно. В соответствии с положениями Методики [2] расчет такого объекта с помощью интегральной или зонной моделей не допускается. Однако, если рассмотреть результаты расчета по полевой модели, становится очевидно, что «детализация» параметров газовой среды при пожаре для такого объекта совершенно лишена смысла, поскольку за небольшой период времени происходит блокирование фактически всей расчетной области (рис. 2).

2. Еще более простой вариант, особенно с точки зрения проверки, это *использование табличной формы определения времени блокирования ($t_{бл}$)* в зависимости от основных характеристик здания (геометрические размеры, высота, объем). В этом случае для разработки соответствующих таблиц могут быть использованы любые расчетные модели. Такая практика использовалась как раньше, так

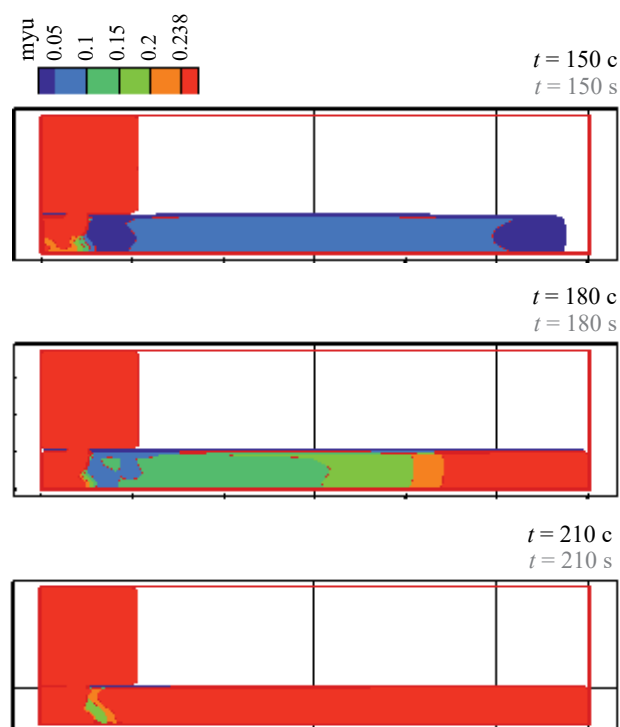


Рис. 2. Оценка времени блокирования для модельного объекта (помещение — коридор)

Fig. 2. Estimation of the blocking time for a model object (room — corridor)

Таблица 3. Необходимое время эвакуации для расчета эвакуационных путей в зданиях зрелищных учреждений (СП 1.13130.2020)

Table 3. The required evacuation time for calculating escape routes in the buildings of entertainment institutions (SP 1.13130.2020)

Виды залов Types of halls	Необходимое время эвакуации, мин Required evacuation time, min						
	из зального помещения при его объеме, тыс. м³, $t_{\text{нб.зал}}$ from the hall with its volume, thousand m³, $t_{\text{req.hall}}$						из здания в целом $t_{\text{нб.зд}}$ from the building as a whole $t_{\text{req.bld}}$
	до 5 / up to 5	10	20	25	40	60	
Залы с колосниковой сценой Halls with a grate stage	1,5	2	2,5	2,5	—	—	6
Залы без колосниковой сцены Halls without a grate stage	2	3	3,5	3,7	4	4,5	6

и сейчас, в частности для зданий зрелищных учреждений (класс функциональной пожарной опасности Ф2) в рамках [16] (табл. 3).

В таблице указаны конкретные значения времени блокирования в зависимости от объема зрительного зала. Кроме того, в своде правил есть рекомендации по корректировке этого времени с учетом класса конструктивной пожарной опасности. Более того, определена зависимость для расчета при более высоких значениях объемов залов в виде:

$$t_{\text{нб.зал}} = 0,115 \cdot \sqrt[3]{W}, \quad (5)$$

где W — объем зрительного зала.

3. Применение простых моделей и расчетных программ для расчета времени эвакуации людей.

В данном случае речь не идет о применении упрощенной модели, но даже индивидуально-поточный метод может быть реализован более просто, чем это делается в большинстве существующих программных комплексов, значительно усложняя процесс расчета. В большей степени, конечно, это касается ввода исходных данных.

Например, еще в 2007 г. во ВНИИПО была разработана достаточно простая модель и соответствующая программа расчета. Эта модель, являясь по сути одномерной, учитывает необходимую двумерность движения людей в процессе эвакуации (рис. 3).

Фактически программа просто определяет локальные плотности, затем скорости соответствующего

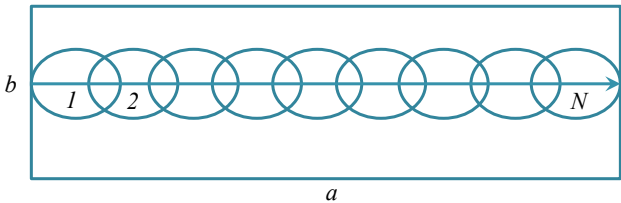


Рис. 3. Модель движения людей на каждом участке пути: a , b — длина и ширина участка; N — количество людей на участке

Fig. 3. A model of the movement of people on each section of the path: a , b — the length and width of the site; N — the number of people on the site

участника движения, а потом осуществляет замену координат. При этом обладает существенной простотой и дает приемлемые результаты, основываясь на принципах моделирования, которые были заложены в [17–19] и используются по настоящее время.

Основным преимуществом при этом является возможность быстрого задания исходных данных непосредственно в табличной форме в любом табличном редакторе (табл. 4).

В качестве результата может быть получена любая информация о движении людей в динамике (рис. 4):

- время эвакуации людей из здания, этажа, помещения;
- локальная плотность и плотность на участке;
- параметры движения для любого человека и т.д.

Таблица 4. Представление исходных данных для программы расчета

Table 4. Presentation of the source data for the calculation programme

Номер участка Section number	Длина Length	Ширина Width	Ширина выхода Exit width	Тип пути Path type	Количество людей Number of people	Номер соседнего участка Number of adjacent section

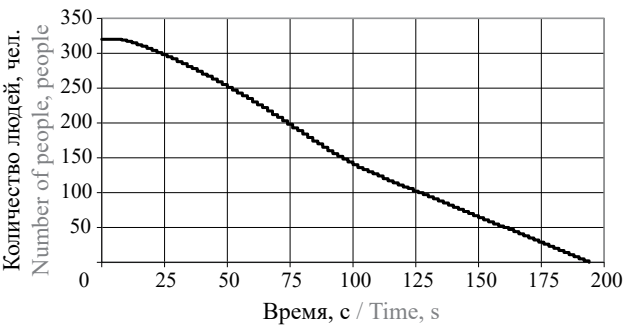


Рис. 4. Динамика движения людей при эвакуации из здания

Fig. 4. Dynamics of movement of people during evacuation from the building

Тестирование программы расчета времени эвакуации

Для подтверждения тезиса об адекватности результатов расчета с помощью разработанной модели, реализованной программно, было использовано несколько специальных тестов, подробное описание которых можно найти в работах [20, 21].

В частности, речь идет о тестах на растекание потока и поддержание скорости свободного движения. Суть теста заключается в проверке свойства растекания потока на участке с открытыми граничными условиями вследствие стремления людей двигаться в условиях комфортной плотности, а также возможности движения фронтальной части потока с большей скоростью. Поддержание скорости свободного движения заключается в отсутствии влияния локальной плотности на скорость движения людей до достижения локальной плотностью определенного значения.

Для проверки указанных свойств моделируется движение людей в объеме двух прямых коридоров шириной 2 м и длиной 50 и 100 м соответственно. Люди в начальный момент равномерно располагаются на первых 50 м коридоров (рис. 5). Вычислительный эксперимент проводится при различных начальных плотностях. При наличии свободного места на путях движения свойство растекания реализуется, а указанный вычислительный эксперимент позволяет это проверить.

Как показывают результаты моделирования, рассматриваемые свойства реализуются, хотя конкрет-



Рис. 5. Область моделирования, начальное расположение людей и начальные плотности людского потока

Fig. 5. The modelling area, the initial location of people and the initial densities of the human flow

ные численные значения средних удельных потоков для разных программных комплексов по результатам расчета имеют отличия (рис. 6).

Кроме того, была проведена расчетная оценка для модельного объекта, в качестве которого рассматривалось 4-этажное офисное здание коридорного типа с двумя лестничными клетками. Количество людей на каждом из этажей составляло 80 человек. Одна лестничная клетка считалась блокированной, таким образом, эвакуация всех людей осуществлялась по одной лестничной клетке.

Результаты моделирования программным комплексом ВНИИПО представлены на рис. 7.

Сравнение результатов расчетов с результатами, полученными с помощью комплекса Сигма Эва, представлено в табл. 5. Из таблицы видно, что согласование общего времени эвакуации, рассчитанного на разных программных комплексах, является удовлетворительным. При этом расчет времени для каждого из этажей здания в отдельности по более простой модели дает более жесткие результаты, увеличивая коэффициент запаса.

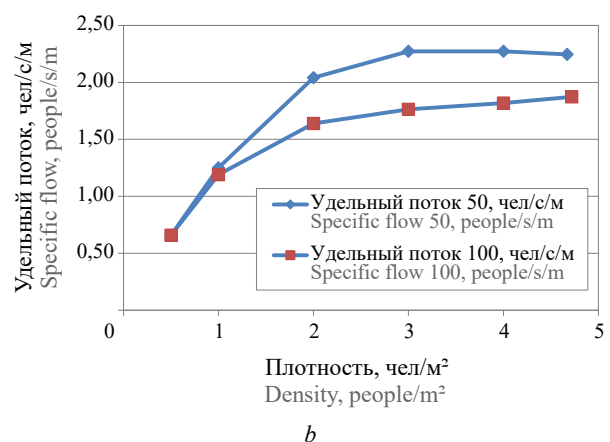
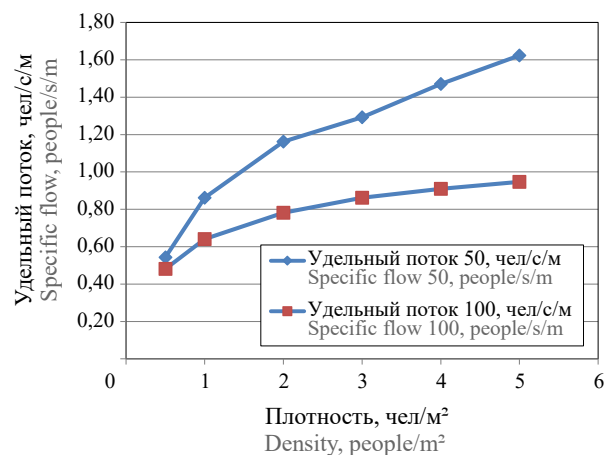


Рис. 6. Результаты численного эксперимента, полученные программным комплексом ВНИИПО (a) и Сигма Эва (b)

Fig. 6. The results of the numerical experiment obtained by the VNIIPPO (a) and Sigma Eva (b) software package

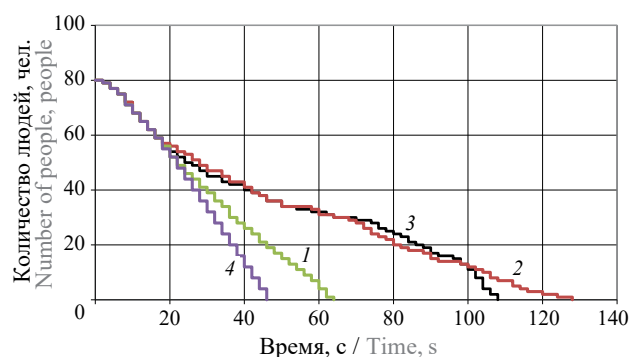


Рис. 7. Динамика эвакуации людей с 1–4-х этажей здания
Fig. 7. Dynamics of evacuation of people from 1–4 floors of the building

Таблица 5. Сравнение расчетного времени эвакуации, полученного программным комплексом ВНИИПО и Sigma

Table 5. Comparison of the estimated evacuation time obtained by the VNIIPPO and Sigma software package

Этажи / Floor	Simple model, c Simple model, s	Sigma, c Sigma, s
Всего / Total	194	222
4-й этаж / 4th floor	46	54
3-й этаж / 3rd floor	108	79
2-й этаж / 2nd floor	128	62
1-й этаж / 1st floor	64	61

Выводы

Описанные в настоящей работе проблемы, связанные с расчетной оценкой пожарного риска, свидетельствуют о значительном несовершенстве дан-

ного инструмента, что, в свою очередь, не позволяет применять его для обоснования многих проектных решений, которые в настоящее время обосновываются таким расчетом до того момента, пока данные проблемы не будут решены.

При этом соответствующие расчетные методики должны развиваться не только по пути усложнения, но и иметь возможность оптимизации с точки зрения практического применения и проверки результатов расчета. Кроме того, с учетом сложившейся ситуации естественной является необходимость ограничения ее применения для ряда случаев, по крайней мере, пока не будет достигнута необходимая точность, либо не будут разработаны соответствующие правовые механизмы, позволяющие пренебречь наличием большой погрешности при выполнении тех или иных условий и регулирующие сферу применения методик, программного обеспечения и работу соответствующих специалистов.

Усложнение в данном случае не дает почти никакого положительного эффекта, а оптимизация позволила бы решить ряд важных задач и незначительно повлиять на точность в рамках инженерной расчетной оценки соответствующих параметров. Примеров такой оптимизации в настоящее время в области действующей нормативной базы по пожарной безопасности имеется достаточное количество, начиная от значительных изменений в нормативно правовых актах (ст. 6 ФЗ-123 [6]), серьезных изменений норм (подход к защите МГН [22] и т.д.) и заканчивая отменой некоторых нормативных документов в полном объеме.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Основы государственной политики Российской Федерации в области защиты населения и территорий от чрезвычайных ситуаций на период до 2030 года : утв. Указом Президента Российской Федерации от 11.01.2018 г. № 12.
2. Методика определения расчетных величин пожарного риска в зданиях, сооружениях и пожарных отсеках различных классов функциональной пожарной опасности : утв. приказом МЧС России от 14.11.2022 № 1140.
3. Литвинцев К.Ю., Кирик Е.С., Ягодка Е.А. Проблемы применения численного моделирования при определении расчетных величин пожарного риска // Вычислительные технологии. 2019. Т. 24. № 4. С. 56–59. DOI: 10.25743/ICT.2019.24.4.005
4. Калмыков С.П., Есин В.М. Время обнаружения очага пожара // Пожаровзрывобезопасность/Fire and Explosion Safety. 2017. № 11 (26). С. 52–63. DOI: 10.18322/PVB.2017.26.11.52-63
5. Сивенков А.Б., Журавлев С.Ю., Журавлев Ю.Ю., Медяник М.В. Об эффективности применения противопожарных дверей в снижении предельно допустимых значений опасных факторов пожара и величины пожарного риска в зданиях и сооружениях различного функционального назначения // Пожаровзрывобезопасность/Fire and Explosion Safety. 2019. № 4 (28). С. 6–14. DOI: 10.18322/PVB.2019.28.04.6-14
6. Технический регламент о требованиях пожарной безопасности : Федеральный закон № 123-ФЗ принят Государственной Думой 04.07.2008 : одобрен Советом Федерации 11.07.2008.
7. Методика определения расчетных величин пожарного риска на производственных объектах : утв. приказом МЧС России от 10.07.2009 № 404.
8. ГОСТ 12.1.004–91. Система стандартов безопасности труда. Пожарная безопасность. Общие требования.

9. Абдурагимов И.М. Еще раз о принципиальной невозможности выполнения расчетов пожарных рисков детерминированными методами // Пожаровзрывобезопасность/Fire and explosion safety. 2013. № 6 (22). С. 13–23.
10. Административный регламент Министерства Российской Федерации по делам гражданской обороны, чрезвычайным ситуациям и ликвидации последствий стихийных бедствий исполнения государственной функции по надзору за выполнением требований пожарной безопасности : Приказ МЧС России от 30.11.2016 № 644.
11. О федеральном государственном пожарном надзоре : Постановление Правительства Российской Федерации № 290 : утв. Правительством Российской Федерации 12.04.2012.
12. Кошмаров Ю.А. Уравнения развития пожара в помещении // Проблемы противопожарной защиты зданий и сооружений : сб. науч. тр. М. : ВИПТШ МВД СССР, 1978. С. 27–33.
13. Молчадский И.С. Пожар в помещении. М. : ВНИИПО, 2005. 456 с.
14. Babrauskas V., Williamson R.B. Post flashover compartment fires: basis of a theoretical model // Fire and Materials. 1978. Vol. 2. Pp. 39–53.
15. Pettersson O., Magnusson S.E., Thor J. Fire engineering design of structures // Swedish Institute of Steel Construction, Publication 50, 1976.
16. СП 1.13130.2020. Системы противопожарной защиты. Эвакуационные пути и выходы.
17. Предтеченский В.М., Милинский А.И. Проектирование зданий с учетом организации движения людских потоков : учеб. пос. для вузов. 2-е изд., доп. и перераб. М. : Стройиздат, 1979. 375 с.
18. Холщевников В.В. Людские потоки в зданиях, сооружениях и на территории их комплексов : дис. ... д-ра техн. наук. М. : МИСИ, 1983.
19. Самошин Д.А. Состав людских потоков и параметры их движения при эвакуации : монография. М. : Академия ГПС МЧС России, 2016. 210 с.
20. Кирик Е.С., Малышев А.В. О тестировании компьютерных программ по расчету времени эвакуации на примере модуля SigmaEva // Пожарная безопасность. 2014. № 1. С. 78–85.
21. Отчет о верификации ПС «Сигма ПБ 6.0» (Sigma Fire Safety 6.0) // ООО «Зк-эксперт», ФГБУН Институт вычислительного моделирования Сибирского отделения РАН, ФГБУН Институт теплофизики им. С.С. Кута-теладзе Сибирского отделения РАН. Красноярск, 2023. 160 с.
22. Барановский А.С. Защита маломобильных групп населения при пожаре в рамках требований действующих нормативных документов. Необходимость или избыточность? // Пожаровзрывобезопасность/Fire and Explosion Safety. 2023. № 1 (32). С. 9–27. DOI: 10.22227/0869-7493.2023.32.01.9-27

REFERENCES

1. *Fundamentals of the state policy of the Russian Federation in the field of protection of the population and territories from emergency situations for the period up to 2030* : Approved by Decree of the President of the Russian Federation No. 12 dated 01.11.2018. (rus).
2. *Methodology for determining the calculated values of fire risk in buildings, structures and fire compartments of various classes of functional fire hazard* : Approved by the order of the Ministry of Emergency Situations of Russia dated 11.14.2022 No. 1140. (rus).
3. Litvintsev K.Yu., Kirik E.S., Yagodka E.A. Problems of applying numerical modeling in determining calculated fire risk values. *Computational Technologies*. 2019; 24(4):56-59. DOI: 10.25743/ICT.2019.24.4.005 (rus).
4. Kalmykov S.P., Esin V.M. The time of detection of the fire source. *Pozharovzryvobezопасnost/Fire and Explosion Safety*. 2017; 11(26):52-63. DOI: 10.18322/PVB.2017.26.11.52-63 (rus).
5. Sivenkov A.B., Zhuravlev S.Yu., Zhuravlev Yu.Yu., Medyanik M.V. On the effectiveness of fire doors in reducing the maximum permissible values of fire hazards and fire risk in buildings and structures of various functional purposes. *Pozharovzryvobezопасnost/Fire and Explosion Safety*. 2019; 4(28):6-14. DOI: 10.18322/PVB.2019.28.04.6-14 (rus).
6. *Technical regulations on fire safety requirements*: Federal Law No. 123-FZ was adopted by the State Duma on 04.07.2008 : Approved by the Federation Council on 07.11.2008. (rus).
7. *Methodology for determining the calculated values of fire risk at production facilities* : Approved by the order of the Ministry of Emergency Situations of Russia dated 07.10.2009 No. 404. (rus).
8. *GOST 12.1.004–91. The system of occupational safety standards. Fire safety. General requirements*. (rus).
9. Abduragimov I.M. Once again about the fundamental impossibility of performing fire risk calculations using deterministic methods. *Pozharovzryvobezопасnost/Fire and explosion safety*. 2013; 6(22):13-23. (rus).
10. *Administrative Regulations of the Ministry of the Russian Federation for Civil Defense, Emergencies and Elimination of Consequences of Natural Disasters for the performance of the State function of supervision over the fulfillment of fire safety requirements* : Order of the Ministry of Emergency Situations of Russia dated 11.30.2016 No. 644. (rus).

11. *About the Federal State fire supervision*: Resolution of the Government of the Russian Federation No. 290 : Approved by the Government of the Russian Federation on 12.04.2012. (rus).
12. Koshmarov Yu.A. Equations of fire development in the room. *Problems of fire protection of buildings and structures : collection of scientific works*. Moscow, VIPTSH of the Ministry of Internal Affairs of the USSR, 1978; 27-33. (rus).
13. Molchadsky I.S. *Fire in the room*. Moscow, VNIPO, 2005; 456 (rus).
14. Babrauskas V., Williamson R.B. Post flashover compartment fires: basis of a theoretical model. *Fire and Materials*. 1978; 2:39-53.
15. Pettersson O., Magnusson S.E., Thor J. Fire engineering design of structures. *Swedish Institute of Steel Construction, Publication 50*. 1976.
16. *SP 1.13130.2020. Fire protection systems. Escape routes and exits*. (rus).
17. Predtechensky V.M., Milinsky A.I. *Designing buildings taking into account the organization of the movement of human flows*. Moscow, Stroyizdat Publ., 1979. (rus).
18. Kholshchevnikov V.V. *Human flows in buildings, structures and on the territory of their complexes : dis. Doctor of Technical Sciences*. Moscow, MISI, 1983. (rus).
19. Samoshin D.A. *Composition of human flows and parameters of their movement during evacuation : monograph*. Moscow, Academy of GPS of the Ministry of Emergency Situations of Russia, 2016; 210. (rus).
20. Kirik E.S., Malyshev A.V. On testing computer programs for calculating evacuation time using the example of the SigmaEva module. *Fire safety*. 2014; 1:78-85. (rus).
21. *Verification report of the Sigma PB 6.0 PS (Sigma Fire Safety 6.0)*. 3k-Expert LLC, FGBUN Institute of Computational Modeling of the Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences, FGBUN S.S. Kutateladze Institute of Thermophysics of the Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences. Krasnoyarsk, 2023; 160.
22. Baranovsky A.S. Protection of low-mobility groups of the population in case of fire within the framework of the requirements of current regulatory documents. Is it necessary or redundant? *Pozharovzryvobezopasnost/Fire and Explosion Safety*. 2023; 1(32):9-27. DOI: 10.22227/0869-7493.2023.32.01.9-27 (rus).

Поступила 12.01.2024, после доработки 27.02.2024;

принята к публикации 04.03.2024

Received January 12, 2024; Received in revised form February 27, 2024;

Accepted March 4, 2024

Информация об авторе

БАРАНОВСКИЙ Алексей Сергеевич, кандидат технических наук, старший научный сотрудник отдела пожарной безопасности промышленных объектов, технологий и моделирования техногенных аварий, 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: 1062586; ResearcherID: HKV-5019-2023; ORCID: 0000-0003-3305-1712; e-mail: komnata110@yandex.ru

Information about the author

Alexey S. BARANOVSKY, Candidate of Technical Sciences, Senior Researcher, Department of Fire Safety of Industrial Facilities, Technologies and Modeling of Man-made Accidents, All-Russian Research Institute for Fire Protection of Ministry of Russian Federation for Civil Defense, Emergencies and Elimination of Consequences of Natural Disasters, VNIPO, 12, Balashikha, Moscow Region, 143903, Russian Federation; ID RISC: 1062586; ResearcherID: HKV-5019-2023; ORCID: 0000-0003-3305-1712; e-mail: komnata110@yandex.ru

ПОЖАРОВЗРЫВОБЕЗОПАСНОСТЬ/FIRE AND EXPLOSION SAFETY. 2024. Т. 33. № 2. С. 15–22
POZHAROVZRYVOBEZOPASNOST/FIRE AND EXPLOSION SAFETY. 2024; 33(2):15-22

НАУЧНАЯ СТАТЬЯ/RESEARCH PAPER

УДК 614.83

<https://doi.org/10.22227/0869-7493.2024.33.02.15-22>

Влияние заглубления легкобрасываемых конструкций на формирование взрывной нагрузки

Вячеслав Александрович Горев, Евгения Юрьевна Челекова,
Антон Дмитриевич Корольченко ✉

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

АННОТАЦИЯ

Введение. Применение легкобрасываемых конструкций (ЛСК) для уменьшения давления при внутреннем взрыве в помещении широко распространено. Кроме того, это мероприятие узаконено нормативно. Однако нормативные документы игнорируют тот распространенный факт, что ЛСК заглублены в проеме как минимум на свою толщину. С момента начала движения ЛСК после разрушения ее крепления к корпусу до момента выхода ЛСК из проема давление взрыва может возрастикратно.

Цель. Определить влияние заглубления ЛСК в проеме на рост давления при внутреннем взрыве на начальной стадии развития взрыва при движении ЛСК внутри проема.

Методы исследования. Экспериментальное исследование проводилось во «взрывной» камере с открывающимся проемом, в котором была установлена модель ЛСК.

Результаты и их обсуждение. Выявлено, что при соблюдении герметичности объема давление взрыва растет пропорционально t^3 , по крайней мере до $\Delta P < 10$ кПа. В случае свободного движения ЛСК внутри проема герметичность системы нарушается по мере развития взрыва. В результате происходит уменьшение давления, при котором ЛСК выходит из проема, по сравнению с расчетным, в условиях герметичности. Тем не менее рост давления даже в условиях негерметичности следует изменению безразмерного параметра B , определяющего процесс на этой стадии взрыва.

Выводы. Процесс контролируется безразмерным параметром B . Количественное отличие обуславливается потерей герметичности системы при росте давления и возникновении силы трения при попытке уплотнить систему. Эти оба обстоятельства уменьшают относительный рост давления взрыва за время движения ЛСК в проеме, если силу трения включать в определение давления, при котором происходит разрушение связей ЛСК с конструкцией.

Ключевые слова: взрыв газа; аварийный взрыв; негерметичность помещения; давление вскрытия; экспериментальные исследования

Для цитирования: Горев В.А., Челекова Е.Ю., Корольченко А.Д. Влияние заглубления легкобрасываемых конструкций на формирование взрывной нагрузки // Пожаровзрывобезопасность/Fire and Explosion Safety. 2024. Т. 33. № 2. С. 15–22. DOI: 10.22227/0869-7493.2024.33.02.15-22

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

The effect of embedment depth of relief structures on explosive loading

Vyacheslav A. Gorev, Evgenia Yu. Chelekova, Anton D. Korolchenko ✉

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

ABSTRACT

Introduction. Using relief structures to reduce pressure in case of an indoor explosion is widely spread. Moreover, it is legitimized by regulations. However, regulatory documents ignore the well-known fact that the embedment depth of relief structures is equal to or exceeds the value of their thickness. As of the moment when the relief structure begins to move after the disintegration of its bonding from the frame and up to the moment when it leaves the opening, explosion pressure may rise exponentially.

Goal. The goal is to determine the effect of embedment depth of a relief structure on the pressure rise during an indoor explosion at the initial stage of explosion development when the relief structure moves in the opening.

Research methods. The experiment was conducted in a blasting chamber with an opening door where the model of a relief structure was installed.

Results and discussion. The authors found that, if the chamber remained hermetically sealed, the explosion pressure increased proportionally to t^3 , at least, up to $\Delta P < 10$ kPa. In case of free motion of a relief structure in

the opening, the tightness of the system degraded as the explosion developed. As a result, the relief structure left the opening if the pressure value was below that identified as a result of calculations made for conditions of tightness. Nevertheless, an increase in pressure, even in case of poor tightness, followed a change in dimensionless parameter B , which determined the process at this stage of explosion development.

Conclusions. The process is controlled by dimensionless parameter B . The quantitative difference is triggered by the system tightness loss, accompanying the pressure rise, and emergence of the friction force accompanying the attempt to hermetically seal the system. These two circumstances reduce the relative explosion pressure rise, while the relief structure is in motion in the opening if the friction force is taken account of in the course of identifying the value of pressure at which bonding between the relief structure and the building are disrupted.

Keywords: gas explosion; emergency explosion; room leak; rupture pressure; experimental research

For citation: Gorev V.A., Chelekova E.Yu., Korolchenko A.D. The effect of embedment depth of relief structures on explosive loading. *Pozharovzryvbezopasnost/Fire and Explosion Safety*. 2024; 33(2):15-22. DOI: 10.22227/0869-7493.2024.33.02.15-22 (rus).

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

Введение

Изучение действия ЛСК на формирование взрывной нагрузки при внутреннем взрыве на начальной стадии его развития происходило без учета заглубления ЛСК внутри перекрываемого проема [1–7]. Тем не менее многие инерционные ЛСК, используемые для защиты взрывоопасных строительных объектов, являются заглубленными¹ [8–12]. Однако в существующих нормативных и регламентирующих документах это обстоятельство игнорируется [13].

Заглубление ЛСК внутри проема начало исследоваться сравнительно недавно [14–16]. Основное влияние на формирование взрывной нагрузки сводилось к следующим эффектам. При сохранении герметичности объема во времени движения ЛСК внутри проема рост давления взрыва происходит в соответствии с условием герметичности. Время движения ЛСК внутри проема и рост давления на этой стадии определяется безразмерным параметром, определяемым отношением времени развития взрыва в объеме к времени смещения ЛСК на глубину установки. Из сказанного следует, что роль заглубления тем критичнее, чем меньше объем помещения и больше скорость горения и чем больше глубина установки и масса ЛСК. Более сложная зависимость наблюдается от величины давления вскрытия, т.е. от давления, при котором начинается движение ЛСК. С одной стороны, чем больше это давление, тем быстрее происходит движение ЛСК и скорее открывается пространство для сброса давления, с другой стороны, само стартовое давление больше. В результате получается, что конечное давление к моменту начала сброса давления будет всегда тем больше, чем больше давление вскрытия (начало движения при прочих одинаковых условиях [15–17]). После выхода ЛСК из проема начинается сброс давления. Движение ЛСК и его эффективность на этой стадии дополнительно опре-

деляется еще одним безразмерным параметром, так как на этой стадии движение характеризуется другим масштабом длины $X_1 = S_0/\Pi$. Это именно то расстояние, на которое должна сместиться ЛСК после выхода из проема, чтобы боковая площадь истечения газов $X_1\Pi$ сравнялась с полной площадью проема S_0 (Π — периметр проема).

В работах [16–19] приведены результаты исследований движения ЛСК на всех стадиях. Эти результаты представлены в безразмерных комплексах и тем самым дают зависимость эффективности ЛСК от ее физических параметров и условий взрыва.

Результаты работ [17–20] получены на основании аналитических и численных решений модельных уравнений, учитывающих движение ЛСК внутри проема и начало истечения газов при выходе ЛСК из проема. Скорость горения предполагалась постоянной, а форма очага сферической. Во время движения ЛСК в проеме сохранялась герметичность объема, трение между ЛСК и стенками проема не учитывалось. Экспериментальных исследований, а следовательно, и экспериментальных результатов по данному вопросу нет [20–23]. Данная работа является первой попыткой экспериментально изучить влияние глубины установки ЛСК в проеме на формирование взрывной нагрузки на начальной стадии внутреннего дефлаграционного взрыва.

Методы исследования

Экспериментальные взрывы проводились в кубической камере с рабочим объемом $V_0 = 0,125 \text{ м}^3$, с открывающимся проемом площадью $S_0 = 0,025 \text{ м}^2$ и периметром $\Pi = 0,6 \text{ м}$. Иницирование осуществлялось в геометрическом центре камеры. Одна грань камеры изготовлена из прозрачного стекла. Это позволяло измерить скорость расширения очага взрыва при помощи скоростной камеры со скоростью 1000 кадров в секунду. Датчик давления был установлен внутри камеры, ЛСК изготавливались из дерева. Внутри проема помещалась втулка, позволяющая регулировать глубину установки ЛСК. Момент

¹ Патент на полезную модель RU 220195 U1. 2023. Запорное устройство для легкосбрасываемой конструкции / А.С. Кирюхин.

начала движения ЛСК и выход его из проема фиксировались визуально с помощью фотосъемки.

Смесь готовилась напуском пропана в камеру с последующим перемешиванием вентилятором. Состав смеси после перемешивания составлял 3 % объемных. После окончания перемешивания смесь выдерживалась 3 мин. Затем происходил запуск видеосъемки и системы измерения давления и осуществлялось искровое поджигание. После взрыва камера вентилировалась в течение 5 мин.

Результаты исследований и их анализ

В первой серии опытов исследовался процесс при сохранении герметичности объема до начала движения ЛСК. Для этого начало движения ЛСК ограничивалось клеящейся лентой — скотчем, закрепляющей ЛСК снаружи по периметру проема. На рис. 1 представлены экспериментальные точки $\Delta P(t)$, часть этих данных составляет табл. 1.

Данные рис. 1 свидетельствуют, что при дефлаграционном взрыве с постоянной скоростью горения давление взрыва на начальной стадии пропорционально t^3 , как это показано в [14, 16]. В следующей серии экспериментов исследовалась динамика взрыва с учетом заглубления ЛСК в проеме и без страховки обеспечения герметичности с использованием скотча.

На рис. 2 представлена типичная осциллограмма $\Delta P(t)$ при взрыве с заглубленной ЛСК.

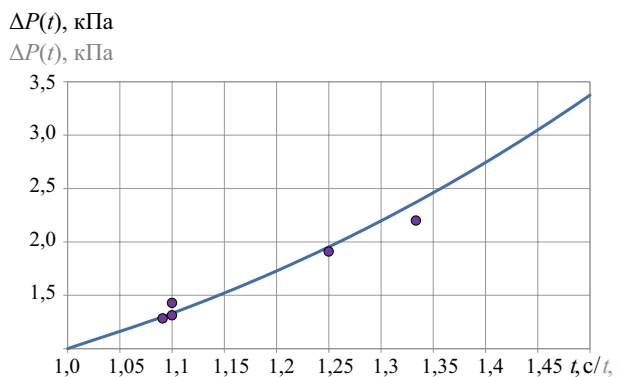


Рис. 1. График зависимости давления от времени является кубической параболой $\Delta P_2/\Delta P_1 = (t_2/t_1)^3$
Fig. 1. The pressure-time graph is a cubic parabola $\Delta P_2/\Delta P_1 = (t_2/t_1)^3$

Таблица 1. Данные опыта № 1
Table 1. Experiment 1 data

t, c t, s	0,03	0,04	0,05	0,055	0,06	0,066
$P, Па$ P, Pa	500	1100	2100	3000	3850	5050
$KW^3,$ $м^3/с^3$ $KW^3,$ $м^3/с^3$	23,15	21,5	21	22,54	22,3	22

Было проведено три серии опытов с вариацией заглубления, массы ЛСК, давления вскрытия и скорости горения.

На рис. 3 дано сравнение зависимости $\Delta P_o/\Delta P_b = (t_o/t_b)^3$ с экспериментальными результатами из трех серий опытов.

График строится на основании зависимости $\Delta P_o/\Delta P_b = (t_o/t_b)^3$ и экспериментальных данных из табл. 2–4.

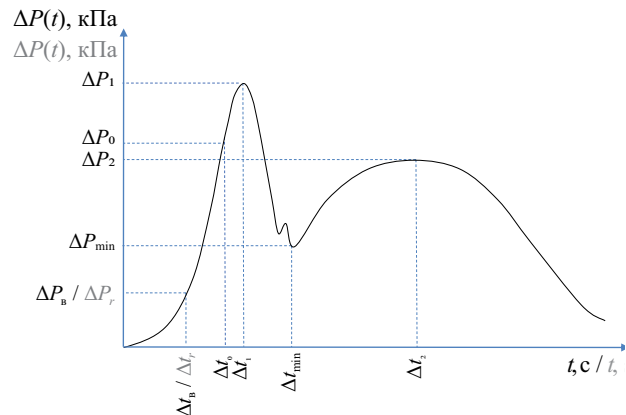


Рис. 2. Изменение давления при взрыве с учетом заглубления ЛСК: ΔP_b — давление «вскрытия», начало движения ЛСК в проеме, кПа; t_b — время начала движения ЛСК в проеме при ΔP_b , с; ΔP_o — давление «открытия», момент выхода ЛСК из проема, кПа; t_o — момент выхода ЛСК из проема при ΔP_o , с; ΔP_1 — пик давления в момент движения ЛСК при t_1 , кПа; t_{min} — время достижения P_{min} при $X_1 = S_0/\Pi$, с; t_2 — время достижения пика давления ΔP_2 при максимальной мощности взрыва, с

Fig. 2. A change in pressure during an explosion, taking into account the embedment depth of a relief structure: ΔP_r is the rupture pressure, the onset of motion of the relief structure in the opening, kPa; t_r is the time when the relief structure starts moving in the opening at ΔP_r , s; ΔP_o is the pressure when the relief structure leaves the opening, kPa; t_o is the moment when the relief structure leaves the opening at ΔP_o , s; ΔP_1 is the pressure peak at the time when the relief structure moves at t_1 , kPa; t_{min} is the time to P_{min} at $X_1 = S_0/\Pi$, s; t_2 is the time to pressure peak ΔP_2 , at maximum power of explosion, s

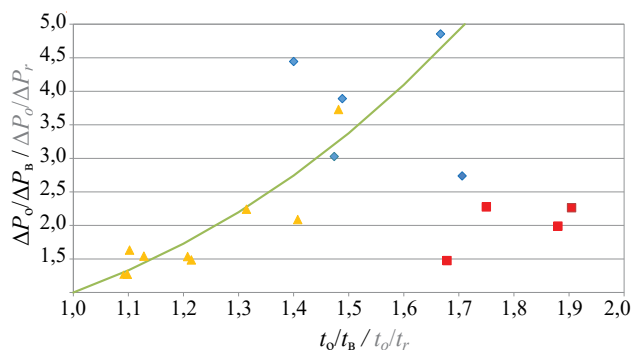


Рис. 3. Сравнение зависимости $\Delta P_o/\Delta P_b = (t_o/t_b)^3$ с экспериментальными результатами из трех серий опытов (табл. 2–4)
Fig. 3. Comparison between dependence $\Delta P_o/\Delta P_b = (t_o/t_b)^3$ with experimental results obtained in the course of three series of experiments (Table 2–4)

Таблица 2. Экспериментальные данные при $X_0 = 0,04$ м, $m = 0,2$ кг**Table 2.** Experimental data at $X_0 = 0.04$ m, $m = 0.2$ kg

t_b / t_r	0,034	0,042	0,05	0,043	0,057
t_o	0,058	0,07	0,07	0,064	0,084
$\Delta P_b / \Delta P_r$	970	620	783	750	1202
ΔP_o	2655	3010	3480	2918	3640
KW_b^3 / KW_r^3	30,8	10,48	7,83	11,81	8,11
KW_o^3	17	10,96	12,7	13,9	7,7

Таблица 3. Экспериментальные данные при $X_0 = 0,02$ м, $m = 0,118$ кг**Table 3.** Experimental data at $X_0 = 0.02$ m, $m = 0.118$ kg

t_b / t_r	0,028	0,021	0,025	0,028
t_o	0,049	0,04	0,047	0,047
$\Delta P_b / \Delta P_r$	716	600	740	742
ΔP_o	1629	1358	1471	1094
KW_b^3 / KW_r^3	40,8	81	59,2	42,25
KW_o^3	17,3	26,5	17,7	13,12

Из рис. 3 вытекает, что общая тенденция экспериментальной зависимости $\Delta P_o / \Delta P_b = t_o / t_b$ следует за теоретической, т.е. $\Delta P_o / \Delta P_b|_o \rightarrow$ растет с ростом $t_o / t_b|_o$. Но этот рост отстает от случая герметичного объема, когда $\Delta P_o / \Delta P_b = (t_o / t_b)^3$. То есть логично сделать вывод, что при нахождении ЛСК в проеме герметичность объема нарушается в большинстве случаев. В случае взрыва в герметичном объеме теоретическая модель при давлениях $\Delta P < 20$ кПа [14, 16] дает зависимость:

$$\Delta P = KW^3 \frac{t^3}{V_0}, \quad (1)$$

где W — видимая скорость пламени, м/с;

V_0 — объем камеры, м³.

В случае сферического очага $K = 4/3 \pi \gamma (\sigma - 1) / \sigma$, $\sigma = \rho_o / \rho_b$ — степень расширения при горении.

При взрыве в герметичном объеме $W = \text{const}$, $K = \text{const}$ во время взрыва на начальной стадии следует, что $KW_o^3 = KW_b^3$.

Обработка данных экспериментов дает в большинстве случаев $KW_o^3 < KW_b^3$, что можно объяснить

потерей герметичности в процессе движения ЛСК в проеме.

При взрыве в герметичном объеме величина KW^3 сохраняется. Поэтому появляется возможность компенсировать негерметичность объема изменением величины KW_b^3 путем приравнивания ее величине KW_o^3 путем корреляции времени t_b . Выбор величины KW_o^3 в виде базовой диктуется в данном случае тем обстоятельством, что давление на первом пике ΔP_1 следует за временем открытия проема t_o и поэтому определяется в большей степени условиями во время t_o , нежели t_b . С учетом проделанной таким образом коррекции величины KW_b^3 , производится корреляция величины t_b и параметра B [16].

В дальнейших расчетах используется значение B , определенное по скорректированному времени $t_b = t_b^c$:

$$B = \frac{\Delta P_b t_b^2}{X_0 \rho_{\pi}}. \quad (2)$$

По скорректированному значению параметра « B » определяется величина $(1 + \Theta) = t_o / t_b$ из соотношения:

$$\frac{4}{5} = \frac{1}{5} (1 + \Theta)^5 - (1 + \Theta) + 0,8. \quad (3)$$

Это соотношение учитывает движение ЛСК внутри проема при начальных условиях t_b^c — скорректированное время вскрытия, ΔP_b^3 — экспериментальное давление вскрытия.

С учетом такой коррекции рис. 3 примет вид рис. 4, который построен по результатам коррекции и экспериментальных данных (табл. 5).

Скорректированный рис. 4 уже лучше соответствует предсказаниям теоретических зависимостей, полученных в предположении герметичности объема во времени движения ЛСК в проеме. Видимо, теоретические оценки давления открытия $\Delta P_o / \Delta P_b$ дают оценку сверху для случая всех возможных негерметичных условий. В то же время ряд экспериментов показывает результаты, когда отношение $\Delta P_o / \Delta P_b$ превышает значение для герметичного объема.

Таблица 4. Экспериментальные данные при $X_0 = 0,01$ м, $m = 0,118$ кг**Table 4.** Experimental data at $X_0 = 0.01$ m, $m = 0.118$ kg

t_b / t_r	0,035	0,027	0,027	0,044	0,053	0,049	0,051	0,039	0,042
t_o	0,046	0,04	0,038	0,048	0,064	0,054	0,056	0,044	0,051
$\Delta P_b / \Delta P_r$	415	405	540	805	870	727	859	835	826
ΔP_o	930	1510	1127	1020	1336	1186	1094	1287	1227
KW_b^3 / KW_r^3	12,1	25,72	34,8	11,8	7,3	7,72	8,1	17,6	13,9
KW_o^3	11,94	29,5	25,7	11,33	6,4	9,4	7,8	18,9	11,6

Таблица 5. Результаты коррекции t_b Table 5. Corrected results t_r

t_o/t_b t_o/t_r	1,51	1,67	1,64	1,57	1,46	–	–	–	–
$\Delta P_o/\Delta P_b$ $\Delta P_o/\Delta P_r$	2,74	4,85	4,44	4	3	–	–	–	–
KW_0^3	17	10,5	12,7	13,9	7,7	–	–	–	–
t_o/t_b t_o/t_r	1,38	1,3	1,37	1,35	–	–	–	–	–
$\Delta P_o/\Delta P_b$ $\Delta P_o/\Delta P_r$	2,27	2,26	2	1,5	–	–	–	–	–
KW_0^3	17,3	26,5	17,7	13,12	–	–	–	–	–
t_o/t_b t_o/t_r	1,37	1,46	1,365	1,23	1,18	1,24	1,19	1,25	1,23
$\Delta P_o/\Delta P_b$ $\Delta P_o/\Delta P_r$	2,14	3,73	2,06	1,25	1,55	1,65	1,21	1,55	1,5
KW_0^3	12	29,5	25,7	11,33	6,4	9,4	7,8	18,9	11,6

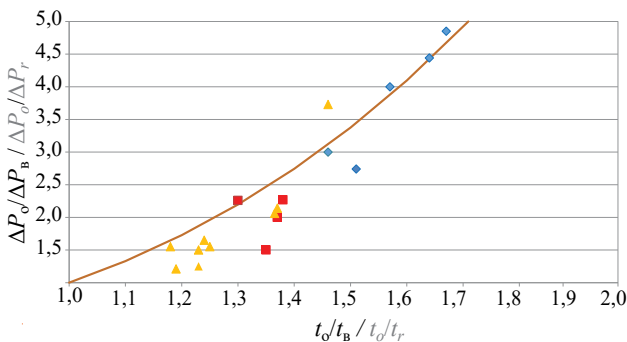


Рис. 4. Сравнение результатов коррекции и экспериментальных данных

Fig. 4. Comparison between corrected results and experimental data

Такое положение возникает в экспериментах, когда путем уплотнения пространства между ЛСК и стенками проема удавалось достичь хорошей герметичности. При этом возникала заметная сила сопротивления.

Значение параметра «В» при этом увеличивалось из-за роста ΔP_b и t_b (см. (2)), что приводило к уменьшению величины t_o/t_b , т.е. происходило смещение точки t_o/t_b в сторону более низких давлений. Такой результат получается при движении ЛСК вверх против силы тяжести [19].

Выводы

Проведено экспериментальное исследование влияния заглубления ЛСК в проеме на развитие взрыва при его начальной стадии до выхода ЛСК из проема. В результате обнаружено, что изменение давления взрыва во время движения ЛСК в проеме следует тенденции, предсказанной в ранних теоретических исследованиях [15–17]. В случае сохранения герметичности объема во времени движе-

ния ЛСК и отсутствия трения результаты хорошо совпадают. При креплении ЛСК без обеспечения герметичности происходит ее нарушение в процессе движения ЛСК внутри проема, что приводит к уменьшению давления в момент выхода ЛСК из проема. Улучшение герметичности путем уплотнения между движущейся поверхностью ЛСК и стенкой проема вызывает увеличение силы трения, что приводит также к отклонению результатов эксперимента от расчетных. Упомянутые отклонения (негерметичность и трение) невозможно предсказать, что значительно усложняет планирование и обработку экспериментов. Сила трения покоя увеличивает давление вскрытия, а следовательно, время вскрытия. В результате увеличивается параметр «В», определяющий давление ЛСК без трения (2), что в свою очередь уменьшает t_o/t_b (3), а следовательно, и отношение $\Delta P_o/\Delta P_b$ для случая герметичного объема, а тем более для случая негерметичного течения процесса на стадии движения ЛСК в проеме. При любой силе сопротивления, в том числе трения, зависимость $\Delta P_o/\Delta P_b \sim (t_o/t_b)^3$ сохраняется для случая герметичного объема.

При постоянной силе сопротивления, например, против силы тяжести и с учетом ее в определении давления вскрытия ΔP_b величина $\Delta P_o/\Delta P_b$ уменьшается в силу уменьшения отношения $(t_o/t_b)^3$.

Для случая сухого трения сила сопротивления изменяется в процессе движения ЛСК в отличие от случая движения против силы тяжести, и эти изменения в условиях практического применения ЛСК непредсказуемы. Влияние изменения силы трения на процесс открытия проема не имеет смысла для практических нужд и выходит за рамки насто-

ящих исследований. Однако на основании проведенных экспериментальных исследований можно утверждать:

1. Изменение давления взрыва во время движения ЛСК в проеме следует тенденциям, предсказанным в [14–16].

2. Отклонение (уменьшение) давления во время начала открытия проема объясняется потерей герметичности объема во время движения ЛСК внутри проема.

3. При уплотнении контакта «ЛСК – стена проема» возникает сила трения, которая также искажает картину.

4. Скорректированные результаты опытов с потерей герметичности, но без трения, хорошо согласуются с результатами [14–16].

5. С точки зрения практики важно отметить, что теоретические результаты работ [14–16] по определению давления открытия можно считать оценкой сверху для отношения $\Delta P_o / \Delta P_v$, если в давлении вскрытия ΔP_v учитывать силу сопротивления (трение).

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Пилюгин Л.П. Обеспечение взрывоустойчивости зданий с помощью предохранительных конструкций // Ассоциация «Пожарная безопасность и наука». М. : Пожарная безопасность и наука, 2000. 224 с.
2. Горев В.А., Салымова Е.Ю. Использование сэндвич-панелей в качестве эффективных легкобрасываемых конструкций при внутренних взрывах в промышленных зданиях // Пожаровзрывобезопасность / Fire and explosion safety. 2010. Т. 19. № 2. С. 41–44.
3. Molkov V.V., Eber R.M., Grigorash A.V., Tamanini F., Dobashi R. Vented gaseous deflagrations: modelling of translating inertial vent covers // Journal of Loss Prevention in the Process Industries. 2003. Vol. 16. Issue 5. Pp. 395–402. DOI: 10.1016/S0950-4230(03)00066-4
4. Molkov V., Grigorash A., Eber R., Tamanini F., Dobashi R. Vented gaseous deflagrations with inertial vent covers: State-of-the-art and progress // Process Safety Progress. 2004. Vol. 23. Issue 1. Pp. 29–36. DOI: 10.1002/prs.10002
5. Расторгуев Б.С., Плотников А.И., Хуснутдинов Д.З. Проектирование зданий и сооружений при аварийных взрывных воздействиях : учеб. пособие. М. : Изд-во АСВ, 2007. 152 с.
6. Bradly D. Evolution of flame propagation in large diameter explosions // Molkov V.V. (ed.). Proceedings of 2nd International Seminar on Fire-and-Explosion Hazard of Substances and Venting Deflagrations. Moscow, All-Russian Research Institute for Fire Protection, 1997. Pp. 51–59.
7. Solberg D.M. Observations of flame instabilities in large scale vented gas explosions // 18th Symposium (International) the combustion institute. 1980. Pp. 1607–1614.
8. Томин С.В. Взрыв теперь можно посчитать! // Ройтмановские чтения : сб. мат. XI науч.-практ. конф. г. Москва, 21 марта 2023 г. / под ред. Д.А. Самошина. М., 2023. С. 91–94.
9. Волчецкая Е.А., Дунаев А.А., Жамойдик С.М., Зинкевич Г.Н., Иваницкий А.Г. Экспериментальные исследования по определению давления вскрытия и изменения угла поворота вращаемых легкобрасываемых конструкций при дефлаграционном взрыве топливовоздушной смеси // Вестник Университета гражданской защиты МЧС Беларуси. 2023. Т. 7. № 1. С. 43–53. DOI: 10.33408/2519-237X.2023.7-1.43
10. Бунто О.В., Жамойдик С.М. Экспериментальные исследования прочностных и деформационных свойств полимерных материалов, рассматриваемых в качестве светопрозрачного заполнения легкобрасываемых конструкций // Вестник Университета гражданской защиты МЧС Беларуси. 2023. Т. 7. № 1. С. 32–42. DOI: 10.33408/2519-237X.2023.7-1.32
11. Кирина А.С. Легкобрасываемые конструкции // Тенденции развития современной науки : сб. тр. науч.-практ. конф. студентов и аспирантов Липецкого государственного технического университета. Липецк, 2023. С. 457–461.
12. Потапьев Д.А. Об опасности взрывов газа в замкнутых строительных объемах // Вестник Санкт-Петербургского университета ГПС МЧС России. 2023. № 2. С. 213–218.
13. Максакова А.В. Исследование нормативной документации на тему легкобрасываемой конструкции и предложение по его изменению // Молодежные инновации : сб. мат. семинара молодых ученых в рамках XXIII Междунар. науч. конф. М., 2020. С. 144–147.
14. Gorev V. Ensuring explosion safety of residential buildings // International Scientific Conference Environmental Science for Construction Industry – ESCI 2018. 2018. Vol. 193. P. 03046. DOI: 10.1051/mateconf/201819303046
15. Горев В.А., Мольков В.В. О зависимости параметров внутреннего взрыва от устройства предохранительных конструкций в проемах ограждающих стен промышленных и жилых зданий // Пожаровзрывобезопасность / Fire and Explosion Safety. 2018. Т. 27. № 10. С. 6–25. DOI: 10.18322/PVB.2018.27.10.6-25
16. Горев В.А., Корольченко А.Д. Влияние легкобрасываемых конструкций на избыточное давление при взрыве в помещении // Пожаровзрывобезопасность / Fire and Explosion Safety. 2022. Т. 31. № 3. С. 12–23. DOI: 10.22227/0869-7493.2022.31.03.12-23

17. 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. No. 162. Pp. 1124–1138. DOI: 10.1016/j.psep.2022.05.009
18. 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
19. Горев В.А., Челекова Е.Ю., Лецев Н.В. Об эффективности легкобрасываемых конструкций, расположенных в покрытии // *Безопасность труда в промышленности*. 2023. № 5. С. 7–14. DOI: 10.24000/0409-2961-2023-5-7-14
20. 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
21. Стрельчук Н.А., Орлов Г.Г. Определение площади вышибных конструкций в зданиях взрывоопасных производств // *Промышленное строительство*. 1969. № 6. С. 19–22.
22. 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.
23. Громов Н.В. Совершенствование технической системы обеспечения взрывоустойчивости зданий при взрывах газо-паровоздушных смесей : дис. ... канд. техн. наук. М. : МГСУ, 2007. 134 с.

REFERENCES

1. Pilyugin L.P. *Forecasting the consequences of internal emergency explosions*. Moscow, Pozhnauka Publ., 2010; 380. (rus).
2. Gorev V.A., Salymova E.Yu. Usage of sandwich-panels as effective easily jettisonable constructions by inside combustions in individual buildings. *Pozharovzryvobezопасnost/Fire and Explosion Safety*. 2010; 19(2):41-44. (rus).
3. Molkov V.V., Eber R.M., Grigorash A.V., Tamanini F., Dobashi R. Vented gaseous deflagrations: modelling of translating inertial vent covers. *Journal of Loss Prevention in the Process Industries*. 2003; 16(5):395-402. DOI: 10.1016/S0950-4230(03)00066-4
4. Molkov V., Grigorash A., Eber R., Tamanini F., Dobashi R. Vented gaseous deflagrations with inertial vent covers: State-of-the-art and progress. *Process Safety Progress*. 2004; 23(1):29-36. DOI: 10.1002/prs.10002
5. Rastorguev B.S., Plotnikov A.I., Khusnutdinov D.Z. *Design of buildings and structures under emergency explosive impacts : textbook*. Moscow, Izd-vo ASV, 2007; 152. (rus).
6. Bradly D. Evolution of flame propagation in large diameter explosions. Molkov V.V. (ed.). *Proceedings of 2nd International Seminar on Fire-and-Explosion Hazard of Substances and Venting Deflagrations*. Moscow, All-Russian Research Institute for Fire Protection, 1997; 51-59.
7. Solberg D.M. Observations of flame instabilities in large scale vented gas explosions. *18-th Symposium (International) the combustion institute*. 1980; 1607-1614.
8. Tomin S.V. The explosion can now be counted! *Romanov readings : Collection of materials of the XI scientific and practical conference*. Moscow, March 21, 2023. D.A. Samoshin (ed.). Moscow, 2023; 91-94. (rus).
9. Volchetskaya E.A., Dunaev A.A., Zhamoydik S.M., Zinkevich G.N., Ivanitskiy A.G. Experimental studies to determine the opening pressure and the change of rotation angle of rotatable easy-to-reset structures during a deflagration explosion of an air-fuel mixture. *Journal of Civil Protection*. 2023; 7(1):43-53. DOI: 10.33408/2519-237X.2023.7-1.43
10. Bunto O.V., Zhamoydik S.M. Experimental investigations of strength and deformation properties of polymeric materials considered as a translucent filling of easy-to-reset structures. *Journal of Civil Protection*. 2023; 7(1):32-42. DOI: 10.33408/2519-237X.2023.7-1.32
11. Kirina A.S. Easily throwable structures. An article in the proceedings of the conference. *Trends in the development of modern science : Proceedings of the scientific and practical conference of students and postgraduates of Lipetsk State Technical University*. Lipetsk, 2023; 457-461. (rus).
12. Potashev D.A. About the danger of gas explosions in closed construction volumes. *Vestnik Saint-Petersburg university of State fire service of EMERCOM of Russia*. 2023; 2(213-218). (rus).
13. Maksakova A.V. A study of regulatory documentation on the topic of an easily removable structure and a proposal to change it. *In the collection: Youth innovations : collection of materials of the seminar of young scientists within the framework of the XXIII International Scientific Conference*. Moscow. 2020; 144-147. (rus).
14. Gorev V. Ensuring explosion safety of residential buildings. *International Scientific Conference Environmental Science for Construction Industry – ESCI 2018*. 2018; 193:03046. DOI: 10.1051/mateconf/201819303046
15. Gorev V.A., Molkov V.V. On the dependence of internal explosion parameters on the installation of safety structures in the apertures of the protecting walls of industrial and residential buildings. *Pozharovzryvobezопасnost/Fire and Explosion Safety*. 2018; 27(10):6-25. DOI: 10.18322/PVB.2018.27.10.6-25 (rus).
16. Gorev V.A., Korolchenko A.D. The effect of venting structures on overpressure caused by an indoor explosion. *Pozharovzryvobezопасnost/Fire and Explosion Safety*. 2022; 31(3):12-23. DOI: 10.22227/0869-7493.2022.31.03.12-23 (rus).

17. 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
18. 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.jobbe.2021.102815
19. Gorev V.A., Chelekova E.Yu., Leshchev N.V. On the efficiency of blast relief panels located in the cover. *Occupational Safety in Industry*. 2023; 5:7-14. DOI: 10.24000/0409-2961-2023-5-7-14 (rus).
20. 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).
21. Strel'chuk N.A., Orlov G.G. Determination of the area of blast structures in buildings of explosive industries. *Pro-myshlennoe stroitel'stvo*. 1969; 6:19-22. (rus).
22. 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).
23. Gromov N.V. *Improvement of the technical system for ensuring 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 19.02.2024, после доработки 07.03.2024;

принята к публикации 15.03.2024

Received February 19, 2024; Received in revised form March 7, 2024;

Accepted March 15, 2024

Информация об авторах

ГОРЕВ Вячеслав Александрович, д-р физ.-мат. наук, профессор кафедры комплексной безопасности в строительстве, Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет, Россия, 129337, г. Москва, Ярославское шоссе, 26; РИНЦ ID: 690901; Scopus AuthorID: 7003846069; ResearcherID: AAD-7691-2022; ORCID: 0000-0002-5096-6722; e-mail: kafedrapb@yandex.ru

ЧЕЛЕКОВА Евгения Юрьевна, канд. техн. наук, доцент кафедры комплексной безопасности в строительстве, Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет, Россия, 129337, г. Москва, Ярославское шоссе, 26; РИНЦ ID: 694334; Scopus AuthorID: 57201185099; ResearcherID: AAD-7630-2022; ORCID: 0000-0002-5921-9088; e-mail: kiara_lion@mail.ru

КОРОЛЬЧЕНКО Антон Дмитриевич, заведующий сектором испытаний научно-исследовательского центра «Взрывобезопасность» Института комплексной безопасности в строительстве, преподаватель кафедры комплексной безопасности в строительстве, 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

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

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Information about the authors

Vyacheslav A. GOREV, Dr. Sci. (Phys.-Math.), Professor of Department of Integrated Safety in Civil Engineering, Moscow State University of Civil Engineering (National Research University), Yaroslavl'skoe shosse, 26, Moscow, 129337, Russian Federation; ID RISC: 690901; Scopus AuthorID: 7003846069; ResearcherID: AAD-7691-2022; ORCID: 0000-0002-5096-6722; e-mail: kafedrapb@yandex.ru

Evgenia Yu. CHELEKOVA, Cand. Sci. (Eng.), Associate Professor of Department of Integrated Safety in Civil Engineering, Moscow State University of Civil Engineering (National Research University), Yaroslavl'skoe shosse, 26, Moscow, 129337, Russian Federation; ID RISC: 694334; Scopus AuthorID: 57201185099; ResearcherID: AAD-7630-2022; ORCID: 0000-0002-5921-9088; e-mail: kiara_lion@mail.ru

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 Civil Engineering, Moscow State University of Civil Engineering (National Research University), Yaroslavl'skoe shosse, 26, Moscow, 129337, Russian Federation; ID RISC: 890113; Scopus AuthorID: 57215919375; ResearcherID: E32952017; ORCID: 000000021383574X; e-mail: Anton.Korolchenko@ikbsmgsu.ru

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

The authors declare no conflict of interest.

Особенности взрыва антрацита в 20-л камере

Николай Львович Полетаев¹✉, Михаил Сергеевич Сазонов², Михаил Юрьевич Коптев²

¹ 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

² Акционерное общество «Научный центр ВостНИИ по промышленной и экологической безопасности в горной отрасли», г. Кемерово, Россия

АННОТАЦИЯ

Введение. Хорошо известен эффект «overdrive», когда взрывозвесь, проявившая взрывоопасность при тестировании в 20-л камере, оказывается безопасной по результатам более надежного тестирования в 1 м³ камере. Завышение взрывоопасности пыли в 20-л камере объясняют предварительным нагревом свежей взрывозвеси пламенем энергоемкого (E_{ig}) источника зажигания. О возможности «overdrive» судят по такому признаку: при $E_{ig} = 10$ кДж индекс взрыва $K_{st} < 4,5$ МПа·м/с (Proust et al., 2007). Данная статья посвящена выявлению дополнительных признаков «overdrive» в 20-л камере на примере взрывобезопасного антрацита для снижения вероятности упомянутой выше качественной ошибки.

Анализ публикаций. Замечен случайный характер проявления взрывоопасности антрацита в широком диапазоне концентраций пыли при $E_{ig} = 5$ кДж (Cashdollar, Chatrathi, 1993). Наблюдаются две точки перегиба на восходящей ветви зависимости давления взрыва антрацита P от времени t , отвечающие сначала минимуму, а затем максимуму dP/dt соответственно. Все эти особенности могут являться признаками «overdrive» после экспериментальной проверки.

Антрацит и метод его исследования. Антрацит с содержанием летучих 2,7 % масс. исследован в 20-л камере Сивека, $E_{ig} = 10$ кДж, с видеосъемкой излучения через смотровое окно.

Результаты. Получены зависимости интенсивности излучения среды и давления в камере от времени в диапазоне концентраций пыли от 125 до 750 г/м³.

Обсуждение и выводы. Подтверждены экспериментально и предложены три дополнительных признака эффекта «overdrive» для антрацита: вероятностный характер проявления взрывоопасности; две точки перегиба на восходящей ветви графика $P(t)$; заметное ослабление излучения среды после выгорания источника зажигания и до момента достижения нижней точки перегиба. Давление взрыва превышало 400 кПа и обусловлено, в основном, выгоранием связанного углерода.

Ключевые слова: уголь; взрывоопасность; камера Сивека; признаки «overdrive»; свечение пламени

Для цитирования: Полетаев Н.Л., Сазонов М.С., Коптев М.Ю. Особенности взрыва антрацита в 20-л камере // Пожаровзрывобезопасность/Fire and Explosion Safety. 2024. Т. 33. № 2. С. 23–31. DOI: 10.22227/0869-7493.2024.33.02.23-31

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

Anthracite dust explosion specificities in 20 L chamber

Nikolay L. Poletaev¹✉, Mikhail S. Sazonov², Mikhail Yu. Koptev²

¹ All-Russian Research Institute for Fire Protection of Ministry of Russian Federation for Civil Defense, Emergencies and Elimination of Consequences of Natural Disasters, Balashikha, Moscow Region, Russian Federation

² Joint-Stock Company “Scientific Center of VOSTNII on Industrial and Environmental Safety in the Mining Industry”, Kemerovo, Russian Federation

ABSTRACT

Introduction. The “overdrive” effect is well known, when dust/air mixture, explosive during testing in a 20 L chamber, turns out to be safe according to the results of more reliable testing in a 1-m³ chamber. The overestimation of the dust explosion hazard in the 20 L chamber is explained by the preheating of the fresh dust/air mixture with the flame of an energy-intensive (E_{ig}) ignition source. The possibility of “overdrive” is judged by the following basis: at $E_{ig} = 10$ kJ, the explosion index $K_{st} < 4.5$ MPa·m/s (Proust et al., 2007). This paper is devoted to the identification of additional signs of “overdrive” in the 20 L chamber using the example of non-explosive anthracite to reduce the probability of the above-mentioned qualitative error.

Analysis of publications. The random nature of anthracite explosiveness over a wide range of dust concentrations at $E_{ig} = 5$ kJ was observed (Cashdollar, Chatrathi, 1993). Two inflection points on the ascending branch of the dependence of the anthracite explosion pressure P on time t are observed, corresponding first to the minimum and then to the maximum dP/dt , respectively. All these features may be signs of “overdrive” after experimental testing.

Anthracite and its research method. Anthracite with the volatile content of 2.7 % wt. was studied in a 20 L. Siwek chamber, $E_{ig} = 10$ kJ, with video recording of radiation through an observation window.

Results. Time dependences of the medium radiation intensity and the pressure in the chamber on time in the range of dust concentrations from 125 to 750 g/m³ are obtained.

Discussion and conclusions. Three additional signs of the “overdrive” effect for anthracite were confirmed experimentally and proposed: probabilistic nature of the explosion hazard; two inflection points on the ascending branch of the graph $P(t)$; noticeable weakening of the medium radiation after the ignition source burnout and before reaching the lower inflection point. The explosion pressure exceeded 400 kPa and was mainly caused by the burning of fixed carbon.

Keywords: coal; explosion hazard; Siwek chamber; overdrive signs; flame glow

For citation: Poletaev N.L., Sazonov M.S., Koptev M.Yu. Anthracite dust explosion in a 20 L chamber. *Pozharovzrybobezopasnost/Fire and Explosion Safety*. 2024; 33(2):23-31. DOI: 10.22227/0869-7493.2024.33.02.23-31 (rus).

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

Введение

Принято считать, что объективную информацию о взрывоопасности взвешенной в воздухе горючей пыли при условиях, близких к нормальным (давление $P = 100$ кПа, температура $T = 298$ К, содержание кислорода 20,6 % об.), следует получать на основе тестирования аэровзвеси в крупномасштабной взрывной камере объемом порядка 1 м³ с энергоемким (10 кДж) пиротехническим источником зажигания (далее ИЗ) [1–3]. В связи с высокой трудоемкостью и значительной стоимостью подобных исследований в подавляющем большинстве лабораторий используют маломасштабные 20-л сферические взрывные камеры конструкции Р. Сивека [4–7], сохраняя по порядку величины энергию источника зажигания E_{ig} (от 2 до 10 кДж). Существенное снижение объема взрывной камеры при сохранении высокой энергии ИЗ вызывает предварительный нагрев исследуемой аэровзвеси, который способствует завышению взрывоопасности дисперсного материала в маломасштабных исследованиях [8–10]. Это, в частности, может привести к качественной ошибке при тестировании пыли на взрывоопасность в 20-л камере, а именно, взрывоопасная по результатам такого исследования пыль может в действительности оказаться взрывобезопасной по более надежным результатам исследования этой пыли в 1-м³ камере. Подобный случай получил в научной литературе наименование «overdrive» [8].

К настоящему времени опубликованы сведения о единственном признаке проявления «overdrive» при тестировании пыли в 20-л камере [9], который сформулирован следующим образом. Если в 20-л камере Р. Сивека при использовании ИЗ с $E_{ig} = 10$ кДж получено значение нормированной скорости нарастания давления взрыва (индекса пожаровзрывоопасности) $K_{st} < 4,5$ МПа·м/с, то весьма вероятно, что данная пыль по результатам испытаний в камере объемом

1 м³ будет признана невзрывоопасной. Выражение «весьма вероятно» предполагает, что данный признак не является абсолютно надежным. Поэтому представляется разумным искать дополнительные признаки проявления «overdrive» при тестировании пыли в 20-л камере для снижения вероятности качественной ошибки при оценке взрывоопасности пыли.

В данной работе выявление дополнительных признаков проявления «overdrive» производится на примере пыли антрацита, которая относится к невзрывоопасным материалам по результатам тестирования в 1-м³ камере, но взрывается в 20-л камере при использовании ИЗ с энергией 5 кДж и более.

Анализ сообщений о взрывоопасности антрацита

Исследованию взрывоопасности аэровзвеси антрацита в режиме волнового распространения пламени или самовоспламенения посвящено много работ [8, 11–16]. Наиболее важная из них [8] выполнена в Горном Бюро США (US Bureau of Mines) при исследовании в 20-л взрывной камере антрацита, характеристики которого приводятся в первой строке табл. 1.

Антрацит не взрывался при $E_{ig} = 2,5$ кДж. При $E_{ig} = 5$ кДж образец проявил взрывоопасность, которая обладала следующей особенностью. В широком диапазоне концентраций горючего от 600 до 1200 г/м³ проявление взрывоопасности носило случайный характер, при котором максимальное давление продуктов горения ИЗ и антрацита в единичном опыте P_m удовлетворяло одному из двух условий: $185 \text{ кПа} \leq P_m \leq 300 \text{ кПа}$ и $480 \text{ кПа} \leq P_m \leq 620 \text{ кПа}$. Согласно [17], только второе из условий отвечает взрыву антрацита.

Таблица 1. Характеристики упомянутых в настоящей работе дисперсных материалов
Table 1. Characteristics of the dispersed materials mentioned in this paper

Образец Specimen	Средний размер частиц, мкм Average particle size, microns	Содержание, % масс. Content, mass %				Теплота сгорания, МДж/кг Heat of combustion, MJ/kg	Источник информации Source of information
		связанного углерода fixed Carbon	летучих volatile	зола ash	влаги moisture		
Антрацит Anthracite	40	79	8	11	2	29,7	[8]
Антрацит Anthracite	20	59	3,34	37,09	0,54	23,7	[12]
Алюминий Aluminum	34	—	—	—	—	31,0	[13]
Антрацит Anthracite	32	92,5	2,8	5,7	—	31,5	Настоящая работа This work

На рис. 1 приводится зависимость частоты проявления антрацитом взрывоопасности ϕ от концентрации антрацита C_s (г/м³) по данным [8]:

$$\phi(C_s) = N_{ex}(C_s)/N_{total}(C_s),$$

где $N_{ex}(C_s)$, $N_{total}(C_s)$ — число зарегистрированных взрывов и общее число выполненных опытов с антрацитом в диапазоне концентраций от $(C_s - 50 \text{ г/м}^3)$ до $(C_s + 50 \text{ г/м}^3)$ соответственно.

Случайный характер проявления антрацитом взрывоопасности объясняется, по-видимому, сочетанием следующих обстоятельств:

- наличие разброса ($\pm 10 \%$) реальной энергии, выделяющейся при горении ИЗ [18];
- конкуренция двух процессов, один из которых способствует росту горючести антрацита (турбулентный перенос тепла от зоны, нагретой выго-

рением ИЗ и примыкающей к нему аэровзвеси, на весь объем камеры [19]), а другой снижает зажигательную способность нагретой области среды из-за уменьшения ее максимальной температуры.

Данное объяснение использует предположение о двухэтапном характере взрыва антрацита в 20-л камере: сначала аэровзвесь прогревается без существенного изменения давления среды, затем осуществляется воспламенение и выгорание аэровзвеси с энергичным ростом давления в камере. Двухэтапный характер взрыва антрацита с необходимостью порождает особенность для зависимости давления в камере P от времени t , которую можно продемонстрировать путем сравнения типичного графика $P(t)$, полученного для пыли, взрывоопасной при нормальных начальных условиях, с графиком $P(t)$ для антрацита (рис. 2 и 3 соответственно). Необходимо отметить, что в оригинальной работе [8] зависимость $P(t)$ для антрацита не приводится. Поэтому на рис. 2 представлен результат работы [11], полученный для условий эксперимента, близких к тем, которые имели место в [8].

Характеристики упомянутых дисперсных материалов приводятся в табл. 1.

На графиках рис. 2 и 3 основной интерес представляет форма восходящего участка зависимости $P(t)$ от момента начала срабатывания источника зажигания (точка IG) до момента достижения максимального давления (точка Max). Общим для обоих графиков является наличие точки перегиба A , отвечающей моменту достижения максимальной скорости изменения давления $(dP/dt)_{max}$. Отличие формы графика для антрацита состоит в наличии дополнительной точки перегиба B , отвечающей моменту достижения минимальной скорости изменения давления $(dP/dt)_{min}$. Как следует из рисунка, точка B расположена между точками IG и A .

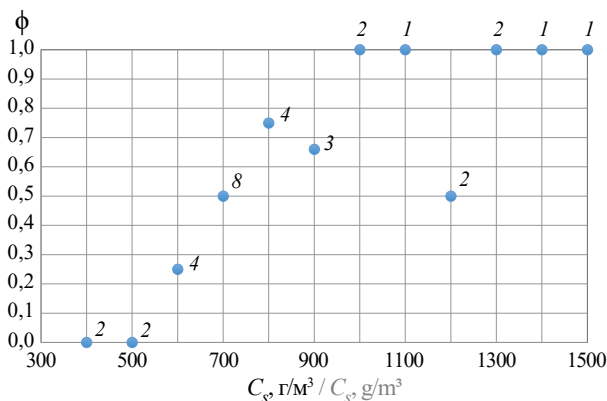


Рис. 1. Влияние концентрации антрацита C_s на частоту взрывов антрацита ϕ , равную отношению числа опытов со взрывом антрацита к общему числу опытов $N(C_s)$ в диапазоне от $(C_s - 50 \text{ г/м}^3)$ до $(C_s + 50 \text{ г/м}^3)$ по данным [8]. Над символом дискретного графика приводится значение $N(C_s)$

Fig. 1. The effect of anthracite concentration C_s on the frequency of anthracite explosions ϕ , equal to the ratio of the number of experiments with anthracite explosion to the total number of experiments $N(C_s)$ in the range from $(C_s - 50 \text{ г/м}^3)$ to $(C_s + 50 \text{ г/м}^3)$ according to [8]. The value $N(C_s)$ is given above the symbol of the discrete graph

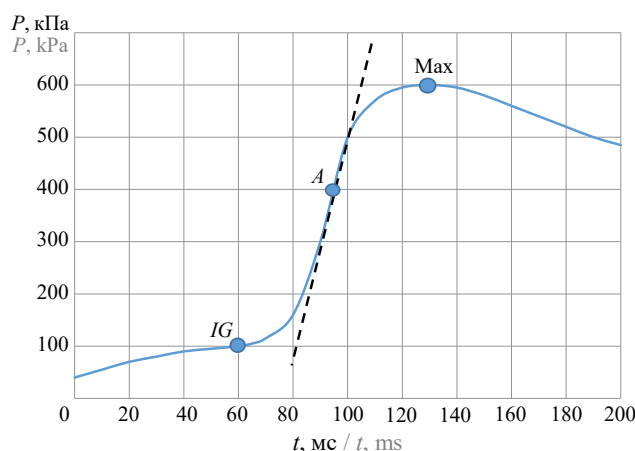


Рис. 2. Пример типичной зависимости абсолютного давления P , кПа, от времени t , мс, в 20-л камере при тестировании пыли, взрывоопасной при нормальных начальных условиях (алюминий, 750 г/м^3 , источник зажигания 5 кДж) [20]

Fig. 2. An example of typical dependence of absolute pressure P , kPa, on time t , ms, in a 20 L chamber when testing dust that is explosive under normal initial conditions (aluminium dust, 750 g/m^3 , ignition source 5 kJ) [20]

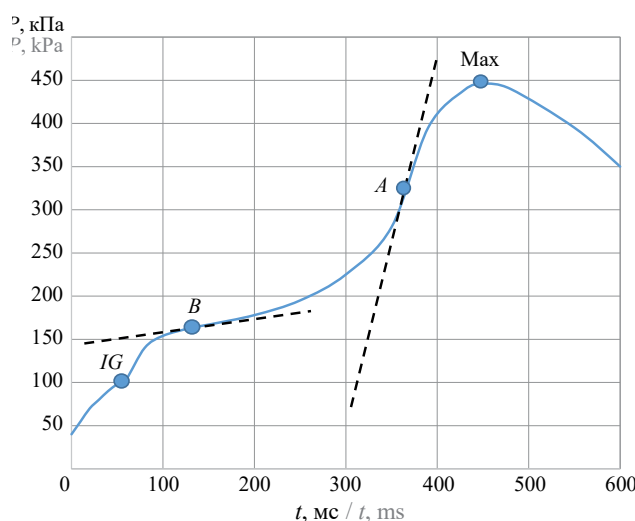


Рис. 3. Зависимость абсолютного давления P от времени t в 20-л камере (источник зажигания 5 кДж, концентрация антрацита 500 г/м^3) [12]

Fig. 3. Dependence of absolute pressure P on time t in a 20 L chamber (ignition source 5 kJ, anthracite concentration 500 g/m^3) [12]

Таблица 2. Гранулометрический состав частиц антрацита
Table 2. Granulometric composition of anthracite particles

Фракция, мкм Fraction, microns	< 140	< 70	< 50	< 45	< 32	< 25	< 18	< 10	< 4	< 1
Содержание, % масс. Content, % wt.	100	90	80	60	50	40	30	20	10	2

Таким образом, особенностью взрыва пыли антрацита является наличие двух перегибов на восходящем участке зависимости $P(t)$. В то же время авторы работы [12] не упоминали о случайном характере проявления антрацитом взрывоопасности, что делает целесообразным дополнительное экспериментальное подтверждение этой особенности.

В связи с вышеизложенным проведены экспериментальные исследования взрывоопасности антрацита в 20-л камере с фиксацией характера проявления взрывоопасности, формы зависимостей $P(t)$ и визуальным восприятием зависимости интенсивности свечения среды в камере от времени. Результаты этого исследования излагаются ниже.

Объект исследования и экспериментальная установка

В качестве дисперсного материала был выбран антрацит, добытый на одной из шахт Кузбасса. Исследуемый образец антрацита был измельчен и высушен до постоянной массы. Его характеристики приводятся в последней строке табл. 1. Подробное распределение частиц образца по размерам, определенное анализатором Analysette 22 Microtec plus, приводится в табл. 2.

Для проведения исследования взрывоопасности антрацита использовалась установка со сферической 20-л взрывной камерой конструкции Р. Сивека [4]. Автоматизированная процедура единичного опыта состояла из последовательности следующих основных операций: частичной откачки камеры (до абсолютного давления 40 кПа), распыления импульсом сжатого воздуха навески пыли в объеме камеры с одновременным восстановлением атмосферного давления, зажигания образовавшейся аэрозвеси пиротехническим зарядом с запасом химической энергии 10 кДж фирмы Simex [18] и регистрации зависимости развивающегося в камере давления P от времени t . Методика единичного опыта подробно описана в [4] и соответствует европейским стан-

дартам определения давления взрыва аэровзвеси¹ и максимальной скорости его нарастания².

Через смотровое окно взрывной камеры производилась видеозапись процессов срабатывания источника зажигания и последующего горения аэровзвеси с частотой 240 кадр/с. Просмотр видеозаписи с частотой 40 кадр/с позволял замедлить регистрируемые процессы для их более доступного визуального восприятия.

Экспериментальные результаты

Результаты семи опытов с антрацитом, проведенных в рамках настоящей работы, представлены в табл. 3. Графики $P(t)$ для каждого из 7 опытов и для случая выгорания ИЗ в отсутствие пыли приводятся на рис. 4. Для опыта № 6 на рис. 5 приводятся отдельные кадры видеосъемки процесса через смотровое окно в камере.

Таблица 3. Показатели тестирования антрацита
Table 3. Anthracite testing indicators

Номер опыта Experiment Number	C_s , г/м ³ C_s , g/m ³	$P_{\max}$, кПа $P_{\max}$, kPa	K_{st} , МПа·м/с K_{st} , MPa·m/s	Вывод Output
1	125	80	0	Нет взрыва No explosion
2	250	90	0	Нет взрыва No explosion
3	250	550	1,0	Взрыв Explosion
4	500	100	0	Нет взрыва No explosion
5	500	550	1,5	Взрыв Explosion
6	500	430	1,2	Взрыв Explosion
7	750	490	1,2	Взрыв Explosion

Примечание: C_s — начальная концентрация антрацита в аэровзвеси; $P_{\max}$ — максимальное избыточное давление (по отношению к атмосферному давлению 100 кПа); K_{st} — нормированная максимальная скорость изменения давления в камере (индекс пожаровзрывоопасности).

Note: C_s is the initial concentration of anthracite in the air suspension; $P_{\max}$ is the maximum overpressure (relative to atmospheric pressure of 100 kPa); K_{st} is the normalized maximum rate of pressure rise in the chamber (explosion index).

¹ EN 14034-1:2004+A1. Determination of explosion characteristics of dust clouds. Part 1: Determination of the maximum explosion pressure $p_{\max}$ of dust clouds, January 2011.

² EN 14034-2:2006+A1. Determination of explosion characteristics of dust clouds. Part 2: Determination of the maximum rate of explosion pressure rise $(dp/dt)_{\max}$ of dust clouds, January 2011.

Обсуждение результатов

Согласно данным табл. 3, во всех опытах с антрацитом в 20-л камере и источником зажигания, имеющим энергию 10 кДж, имело место неравенство $K_{st} \leq 1,5$ МПа м/с. Поскольку антрацит не взрывается в условиях крупномасштабных испытаний, отмеченное неравенство не противоречит известному эмпирическому правилу о возможности возникновения «overdrive» [8].

Данные табл. 3 выявляют особенность проявления «overdrive», которая заключается в наличии вероятностного проявления взрывоопасности антрацита, по крайней мере, в диапазоне концентраций пыли C_s от 250 до 500 г/м³. В этом диапазоне сосуществуют два графика зависимости $P_{\max}(C_s)$: график «нет взрыва» и график «взрыв», разделенные зазором, превышающим 300 кПа. В отличие от аналогичного результата, полученного в [8] (см. рис. 1), нижняя граница диапазона C_s , относящегося к графику «взрывов», простирается до меньших значений концентрации пыли. Последнее разумно объяснить использованием в данной работе более энергоемкого источника зажигания (10 против 5 кДж в [8]), что с необходимостью влечет снижение нижнего концентрационного предела распространения пламени.

Низкое содержание летучих в исследованном антраците (2,8 % масс.) исключает возникновение избыточного давления продуктов горения 550 кПа при концентрации аэровзвеси 250 г/м³ (табл. 3, строка 3) только за счет выгорания летучих. Макси-

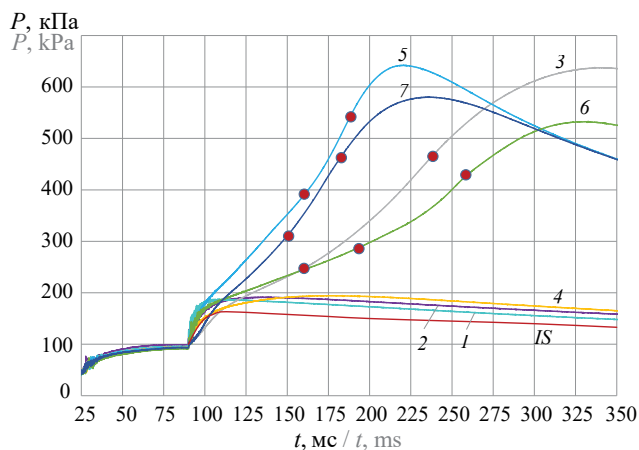


Рис. 4. Зависимость абсолютного давления в 20-л камере P , кПа, от времени t , мс, для опытов с антрацитом. Номер зависимости совпадает с номером опыта из табл. 3. Жирными точками отмечены два перегиба на каждом из графиков зависимости. IS — график $P(t)$ для случая выгорания источника зажигания в отсутствие пыли

Fig. 4. Absolute pressure in the 20 L chamber P , kPa, dependence on the time t , ms, for experiments with anthracite. The number of the dependency coincides with the number of the experiment from the Table 3. Two inflections on each of the dependency graphs are marked with bold dots. IS — the graph $P(t)$ for the case of ignition source burnout in the absence of dust

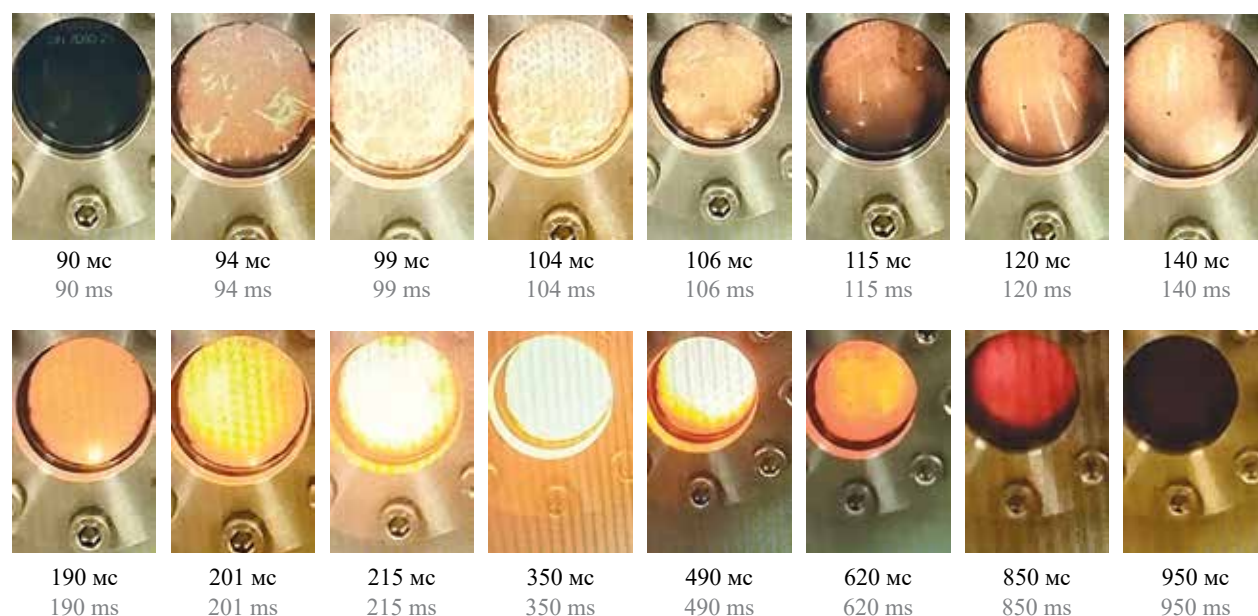


Рис. 5. Кадры видеосъемки свечения из смотрового окна камеры на протяжении опыта № 6 от момента инициирования источника зажигания ($t = 90$ мс) до момента завершения свечения ($t = 950$ мс)

Fig. 5. Video footage of the glow from the camera viewing window during experiment No. 6 from the moment of ignition source initiation ($t = 90$ ms) to the moment of glow completion ($t = 950$ ms)

мальный вклад выгорания летучих в этом случае можно оценить величиной порядка 80 кПа. Таким образом, взрыв антрацита обеспечивался выгоранием связанного углерода.

Согласно данным рис. 4, на восходящем участке всех графиков $P(t)$, относящихся к взрыву антрацита, можно заметить два перегиба. Верхний перегиб является типичным для результатов тестирования пылей, поскольку отвечает моменту достижения максимальной скорости изменения давления $(dP/dt)_{\max}$ и относится к этапу относительно быстрого развития взрыва. Нижний перегиб является особенностью проявления эффекта «overdrive» и формально характеризует окончание этапа сравнительно медленного развития взрыва, который берет начало от момента полного выгорания источника зажигания.

На рис. 5 приводятся кадры видеосъемки свечения из смотрового окна камеры для опыта № 6. Согласно данным рис. 5, промежуток времени, на котором происходит ослабление свечения после вспышки источника зажигания, составляет интервал (115 с ... 190 с). Промежуток времени от момента полного выгорания источника зажигания (110 с) до нижней точки перегиба (180 с) составляет примерно такой же интервал. Таким образом, этап относительно медленной подготовки энергичного взрыва близок по времени с проявлением другой особенности рассматриваемого процесса, а именно с резким ослаблением интенсивности свечения из смотрового окна камеры.

Выводы

Выполнены исследования взрывоопасности пыли антрацита в 20-л камере Сивека с пиротехническим источником зажигания фирмы Simex (2×5 кДж). Показано, что в упомянутых условиях исследования возможен взрыв антрацита. Поскольку антрацит не взрывоопасен в условиях крупномасштабных испытаний, следует признать, что условия настоящей работы приводят к эффекту «overdrive» из-за предварительного нагрева исследуемой аэрозвеси вследствие выгорания источника зажигания и расположенного в его окрестности антрацита.

Результаты работы подтвердили известную особенность возможного возникновения эффекта «overdrive»: индекс взрывоопасности антрацита K_{st} не превышает 4,5 МПа м/с.

В диапазоне концентраций антрацита от 250 до 500 г/м³ подтверждается впервые описанный в [8] вероятностный характер проявления взрывоопасности антрацита, что позволяет считать это обстоятельство второй особенностью возникновения «overdrive».

Третья особенность возникновения «overdrive» для антрацита состоит в появлении дополнительной (нижней) точки перегиба на графике зависимости давления в камере P от времени t .

Четвертая особенность возникновения «overdrive» для антрацита состоит в резком ослаблении интенсивности излучения среды в камере на промежутке времени от момента полного выгорания источника зажигания до появления нижней точки перегиба на графике $P(t)$.

Наблюдавшиеся в эксперименте взрывы антраценового углерода. Вклад летучих в давление взрыва не превышал 15 %.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. *Eckhoff R.K.* Dust explosions in the process industries : 3rd ed. Boston : Gulf Professional Publishing/Elsevier, 2003. 720 p.
2. *Addo A., Dastidar A.G., Taveau J.R., Morrison L.S., Khan F.I., Amyotte P.R.* Niacin, lycopodium and polyethylene powder explosibility in 20-l and 1-m³ test chambers // *Journal of Loss Prevention in the Process Industries*. 2019. Vol. 62. P. 103937. DOI: 10.1016/j.jlp.2019.103937
3. *Huésca Medina C., MacCoitir B., Sattar H., Slatter D.J.F., Phylaktou H.N., Andrews G.E. et al.* Comparison of the explosion characteristics and flame speeds of pulverised coals and biomass in the ISO standard 1 m³ dust explosion equipment // *Fuel*. 2015. Vol. 151. Pp. 91–101. DOI: 10.1016/j.fuel.2015.01.009
4. *Cesana C., Siwek R.* Operating instructions 20-l-apparatus. Ver. 7.0, Kühner AG, Birsfelden. 2009.
5. *Zlochow I.A., Sapko M.J., Perera I.E., Brown C.B., Harris M.L., Rayyan N.S.* Influence of specific surface area on coal dust explosibility using the 20-L chamber // *Journal of Loss Prevention in the Process Industries*. 2018. Vol. 54. Pp. 103–109. DOI: 10.1016/j.jlp.2018.03.004
6. *Liu S.-H., Cheng Y.-F., Meng X.-R., Ma H.-H., Song S.-X., Liu W.-J. et al.* Influence of particle size polydispersity on coal dust explosibility // *Journal of Loss Prevention in the Process Industries*. 2018. Vol. 56. Pp. 444–450. DOI: 10.1016/j.jlp.2018.10.005
7. *Zhang J., Sun L., Nie F., Zhou H.* Effects of particle size distribution on the explosion severity of coal dust. *Energy sources, Part A: Recovery, Utilization, and Environmental Effects*. 2019. Pp. 1–11. DOI: 10.1080/15567036.2019.1654562
8. *Cashdollar K.L., Chatrathi K.* Minimum Explosible dust concentrations measured in 20-l and 1-m³ chambers // *Combustion Science and Technology*. 1993. Vol. 87. Pp. 157–171. DOI: 10.1080/00102209208947213
9. *Proust Ch., Accorsi A., Dupont L.* Measuring the violence of dust explosions with the “20 l sphere” and with the standard “ISO 1 m³ vessel”. Systematic comparison and analysis of the discrepancies // *Journal of Loss Prevention in the Process Industries*. 2007. Vol. 20. Pp. 599–606. DOI: 10.1016/j.jlp.2007.04.032
10. *Cloney C.T., Amyotte P.R., Khan F.I., Ripley R.C.* Development of an organizational framework for studying dust explosion phenomena // *Journal of Loss Prevention in the Process Industries*. 2014. Vol. 30. Pp. 228–235. DOI: 10.1016/j.jlp.2013.09.002
11. *Ren K., Guo Y., Huang W., Wei A., Wu D.* Explosion characteristics of coal dusts in O₂/N₂ ambience: A novel method to determine limiting oxygen concentration // *Fuel*. 2022. Vol. 324. P. 124673. DOI: 10.1016/j.fuel.2022.124673
12. *Zhao P., Schmidt M., Krause U., Duan Q., Krietsch A., Wu D.* Experimental study on the minimum explosion concentration of anthracite dust: The roles of O₂ mole fraction, inert gas and CH₄ addition // *Journal of Loss Prevention in the Process Industries*. 2021. Vol. 71. P. 104490. DOI: 10.1016/j.jlp.2021.104490
13. *Tan X., Schmidt M., Zhao P., Wei A., Huang W., Qian X. et al.* Minimum ignition temperature of carbonaceous dust clouds in air with CH₄/H₂/CO below the gas lower explosion limit // *Fuel*. 2020. Vol. 264. P. 116811. DOI: 10.1016/j.fuel.2019.116811
14. *Wang J., Meng X., Zhang Y., Chen H., Liu B.* Experimental study on the ignition sensitivity and explosion severity of different ranks of coal dust // *Shock and Vibration*. 2019. Pp. 1–11. DOI: 10.1155/2019/2763907
15. *Thakur P.* Gas and dust explosions // *Advanced mine ventilation*. 2019. Pp. 377–398. DOI: 10.1016/b978-0-08-100457-9.00023-7
16. *Zhao P., Tan X., Schmidt M., Wei A., Huang W., Qian X. et al.* Minimum explosion concentration of coal dusts in air with small amount of CH₄/H₂/CO under 10-kJ ignition energy conditions // *Fuel*. 2020. Vol. 260. P. 116401. DOI: 10.1016/j.fuel.2019.116401
17. *Полетаев Н.Л.* О проблеме экспериментального обоснования низкой взрывоопасности горючей пыли в 20-л камере // *Пожаровзрывобезопасность/Fire and Explosion Safety*. 2017. Т. 26. № 6. С. 5–20. DOI: 10.18322/PVB.2017.26.06.5-20
18. *Krietsch A., Scheid M.* Test on suitability of a new pyrotechnical igniter for determination of explosion characteristics of dust clouds in 20-l-sphere and 1-m³-vessel // *Sci. Tech of Energetic Materials*. 2011. Vol. 72. No. 6. Pp. 174–178.
19. *Portarapillo M., Sanchirico R., Di Benedetto A.* On the pyrotechnic ignitors role in dust explosion testing: Comparison between 20 L and 1 m³ explosion vessels // *Proc. Safety Prog.* 2021. P. e12249. DOI: 10.1002/prs.12249
20. *Guo Y., Ren K., Huang W., Wu D.* An alternative explosion criterion of combustible dusts based on combustion duration time: Applications for minimum explosion concentration and limiting oxygen concentration // *Powder Technology*. 2022. Vol. 409 (1). P. 117851. DOI: 10.1016/j.powtec.2022.117851

REFERENCES

1. Eckhoff R.K. Dust explosions in the process industries: 3rd ed. *Gulf Professional Publishing/Elsevier*. Boston, 2003; 720.
2. Addo A., Dastidar A.G., Taveau J.R., Morrison L.S., Khan F.I., Amyotte P.R. Niacin, lycopodium and polyethylene powder explosibility in 20-L and 1-m³ test chambers. *Journal of Loss Prevention in the Process Industries*. 2019; 62:103937. DOI: 10.1016/j.jlp.2019.103937
3. Huéscar Medina C., MacCoitir B., Sattar H., Slatter D.J.F., Phylaktou H.N., Andrews G.E. et al. Comparison of the explosion characteristics and flame speeds of pulverised coals and biomass in the ISO standard 1 m³ dust explosion equipment. *Fuel*. 2015; 151:91-101. DOI: 10.1016/j.fuel.2015.01.009
4. Cesana C., Siwek R. *Operating Instructions 20-l-Apparatus. Ver. 7.0, Kühner AG, Birsfelden*. 2009.
5. Zlochower I.A., Sapko M.J., Perera I.E., Brown C.B., Harris M.L., Rayyan N.S. Influence of specific surface area on coal dust explosibility using the 20-L chamber. *Journal of Loss Prevention in the Process Industries*. 2018; 54:103-109. DOI: 10.1016/j.jlp.2018.03.004
6. Liu S.-H., Cheng Y.-F., Meng X.-R., Ma H.-H., Song S.-X., Liu W.-J. et al. Influence of particle size polydispersity on coal dust explosibility. *Journal of Loss Prevention in the Process Industries*. 2018; 56:444-450. DOI: 10.1016/j.jlp.2018.10.005
7. Zhang J., Sun L., Nie F., Zhou H. *Effects of particle size distribution on the explosion severity of coal dust. Energy Sources, Part A: Recovery, Utilization, and Environmental Effects*. 2019; 1-11. DOI: 10.1080/15567036.2019.1654562
8. Cashdollar K.L., Chatrathi K. Minimum Explosible dust concentrations measured in 20-l and 1-m³ chambers. *Combustion Science and Technology*. 1993; 87:157-171. DOI: 10.1080/00102209208947213
9. Proust Ch., Accorsi A., Dupont L. Measuring the violence of dust explosions with the “20 l sphere” and with the standard “ISO 1 m³ vessel”. Systematic comparison and analysis of the discrepancies. *Journal of Loss Prevention in the Process Industries*. 2007; 20:599-606. DOI: 10.1016/j.jlp.2007.04.032
10. Cloney C.T., Amyotte P.R., Khan F.I., Ripley R.C. Development of an organizational framework for studying dust explosion phenomena. *Journal of Loss Prevention in the Process Industries*. 2014; 30:228-235. DOI: 10.1016/j.jlp.2013.09.002
11. Ren K., Guo Y., Huang W., Wei A., Wu D. Explosion characteristics of coal dusts in O₂/N₂ ambience: A novel method to determine limiting oxygen concentration. *Fuel*. 2022; 324:124673. DOI: 10.1016/j.fuel.2022.124673
12. Zhao P., Schmidt M., Krause U., Duan Q., Krietsch A., Wu D. Experimental study on the minimum explosion concentration of anthracite dust: The roles of O₂ mole fraction, inert gas and CH₄ addition. *Journal of Loss Prevention in the Process Industries*. 2021; 71:104490. DOI: 10.1016/j.jlp.2021.104490
13. Tan X., Schmidt M., Zhao P., Wei A., Huang W., Qian X. et al. Minimum ignition temperature of carbonaceous dust clouds in air with CH₄/H₂/CO below the gas lower explosion limit. *Fuel*. 2020; 264:116811. DOI: 10.1016/j.fuel.2019.116811
14. Wang J., Meng X., Zhang Y., Chen H., Liu B. Experimental study on the ignition sensitivity and explosion severity of different ranks of coal dust. *Shock and Vibration*. 2019; 1-11. DOI: 10.1155/2019/2763907
15. Thakur P. Gas and dust explosions. *Advanced Mine Ventilation*. 2019; 377-398. DOI: 10.1016/b978-0-08-100457-9.00023-7
16. Zhao P., Tan X., Schmidt M., Wei A., Huang W., Qian X. et al. Minimum explosion concentration of coal dusts in air with small amount of CH₄/H₂/CO under 10-kJ ignition energy conditions. *Fuel*. 2020; 260:116401. DOI: 10.1016/j.fuel.2019.116401
17. Poletaev N.L. On the problem of experimental justification of low explosibility for dust/air mixture in the 20-l chamber. *Pozharovzryvbezopasnost/Fire and Explosion Safety*. 2017; 26(6):5-20. DOI: 10.18322/PVB.2017.26.06.5-20 (rus).
18. Krietsch A., Scheid M. Test on suitability of a new pyrotechnical igniter for determination of explosion characteristics of dust clouds in 20-l-sphere and 1-m³-vessel. *Sci. Tech of Energetic Materials*. 2011; 72(6):174-178.
19. Portarapillo M., Sanchirico R., Di Benedetto A. On the pyrotechnic ignitors role in dust explosion testing: Comparison between 20 L and 1 m³ explosion vessels. *Proc Safety Prog*. 2021; e12249. DOI: 10.1002/prs.12249
20. Guo Y., Ren K., Huang W., Wu D. An alternative explosion criterion of combustible dusts based on combustion duration time: Applications for minimum explosion concentration and limiting oxygen concentration. *Powder Technology*. 2022; 409(1):117851. DOI: 10.1016/j.powtec.2022.117851

Поступила 20.11.2023, после доработки 08.12.2023;
принята к публикации 14.12.2023

Received November 20, 2023; Received in revised form December 8, 2023;

Accepted December 14, 2023

Информация об авторах

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

САЗОНОВ Михаил Сергеевич, канд. техн. наук, старший научный сотрудник, Акционерное общество «Научный центр ВостНИИ по промышленной и экологической безопасности в горной отрасли», Россия, 650002, Кемеровская обл., Кузбасс, Кемеровский г.о.; г. Кемерово, ул. Институтская, 3, помещ. 1; РИНЦ ID: 543411; ORCID: 0000-0001-9000-7115; e-mail: m.sazonov@nc-vostnii.ru

КОПТЕВ Михаил Юрьевич, и.о. заведующего лабораторией борьбы с пылью и пылевзрывозащиты, Акционерное общество «Научный центр ВостНИИ по промышленной и экологической безопасности в горной отрасли», Россия, 650002, Кемеровская обл., Кемеровский г.о.; г. Кемерово, ул. Институтская, 3, помещ. 1; РИНЦ ID: 893607; ORCID: 0009-0004-3812-9747; e-mail: m.koptev@nc-vostnii.ru

Вклад авторов:

Полетаев Н.Л. — научное руководство; концепция исследования; написание исходного текста; итоговые выводы.

Сазонов М.С., Коптев М.Ю. — эксперимент.

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Information about the author

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

Mikhail S. SAZONOV, Cand. Sci. (Eng.), Senior Researcher, Joint-Stock Company “Scientific Center of VOSTNII on Industrial and Environmental Safety in the Mining Industry”, Institutsкая, 3, room 1, Kemerovo, Kemerovo Region, Kuzbass, 650002, Russian Federation; ID RISC: 543411; ORCID: 0000-0001-9000-7115; e-mail: m.sazonov@nc-vostnii.ru

Mikhail Yu. KOPTEV, Senior Researcher, Joint-Stock Company “Scientific Center of VOSTNII on Industrial and Environmental Safety in the Mining Industry”, Institutsкая, 3, room 1, Kemerovo, Kemerovo Region, Kuzbass, 650002, Russian Federation; ID RISC: 893607; ORCID: 0009-0004-3812-9747; e-mail: m.koptev@nc-vostnii.ru

Contribution of the authors:

Nikolay L. POLETAEV — scientific guidance; research concept; writing the source text; final conclusions.

Mikhail S. SAZONOV, Mikhail Yu. KOPTEV — an experiment.

The authors declare that there is no conflict of interest.

Исследование изменений свойств огнезащитных покрытий интумесцентного типа методом термомеханического анализа

Татьяна Юрьевна Еремина¹, Сергей Вячеславович Уткин²✉

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

² Судебно-экспертное учреждение Федеральной противопожарной службы «Испытательная пожарная лаборатория» по городу Санкт-Петербургу», г. Санкт-Петербург, Россия

АННОТАЦИЯ

Введение. Огнезащита металлических конструкций является одной из актуальных проблем повышения огнестойкости сооружений, для чего в настоящее время применяются материалы интумесцентного типа, которые имеют ограниченный срок службы. При этом техническая документация на средства огнезащиты не имеет данных о сохранении свойств созданной огнезащитной системы в зависимости от сроков и условий эксплуатации. Целью исследования является апробирование метода термомеханического анализа для оценки сохранности огнезащитных свойств огнезащитной системы в ходе ее эксплуатации.

Теоретические основы. В современных условиях экспериментальная оценка сохранения свойств средств огнезащиты, как правило, не проводится, производитель ограничивается проведением испытаний по определению значений огнезащитной эффективности средства огнезащиты, что противоречит требованиям национальных стандартов. В настоящий момент стандартизированные методы испытаний по сохранению огнезащитных свойств средств огнезащиты в зависимости от сроков и условий эксплуатации в нашей стране отсутствуют.

Методы. В ходе проведения экспериментов были определены оптимальные параметры проведения испытаний средств огнезащиты методом термомеханического анализа (ТМА) и исследованы изменения термомеханических характеристик средств огнезащиты, подверженных климатическому старению.

Результаты и их обсуждение. Анализируя полученные результаты, можно отметить, что в процессе старения образцов в покрытии происходят существенные изменения, влияющие на формирование теплозащитного пенококсового слоя, что ведет к невозможности созданной огнезащитной системы выполнить свои функции по обеспечению требуемого предела огнестойкости в условиях эксплуатации. Коэффициент объемного расширения средств огнезащиты, подверженных климатическому старению, снижается более чем на 40 % при эксплуатации 6 и более лет.

Выводы. Проведенное исследование показало, что функции по формированию теплоизолирующего слоя огнезащитного покрытия при эксплуатации более 3 лет существенно снижаются. Применение метода термомеханического анализа может служить дополнительной идентификационной характеристикой средства огнезащиты для оценки сохранения ее свойств при эксплуатации.

Ключевые слова: огнезащитные вспучивающиеся краски; огнезащитная эффективность; огнезащитные свойства; методы термического анализа; срок эксплуатации

Для цитирования: Еремина Т.Ю., Уткин С.В. Исследование изменений свойств огнезащитных покрытий интумесцентного типа методом термомеханического анализа // Пожаровзрывобезопасность/Fire and Explosion Safety. 2024. Т. 33. № 2. С. 32–41. DOI: 10.22227/0869-7493.2024.33.02.32-41

✉ Уткин Сергей Вячеславович, e-mail: utkin.s.v@78.mchs.gov.ru

Study of changes in the properties of fire-retardant coatings of intumescent type by thermomechanical analysis method

Tatyana Yu. Eremina¹, Sergey V. Utkin²✉

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

² Federal Fire Service "Fire Test Laboratory" for the city of Saint Petersburg", Saint Petersburg, Russian Federation

ABSTRACT

Introduction. Fire protection of metal structures is one of the urgent problems of increasing fire resistance of structures, for which purpose intumescent type materials are currently used, which have a limited service life. At the same time, technical documentation on fire protection means has no data on the preservation of prop-

erties of the created fire protection system depending on the terms and conditions of operation. The aim of the study is to approve the method of thermomechanical analysis to assess the preservation of fire protection properties of the fire protection system during its operation.

Theoretical foundations. In modern conditions, experimental assessment of the preservation of properties of fire protection means, as a rule, is not carried out, the manufacturer is limited to conducting tests to determine the values of fire protection effectiveness of fire protection means, which contradicts the requirements of national standards. At the moment, there are no standardized test methods for the preservation of fire protection properties of fire protection means depending on the terms and conditions of operation in our country.

Methods. Optimal parameters for testing fire protection products using the thermomechanical analysis (TMA) method were determined, and changes in fire protection products subjected to climatic aging were investigated. The authors suggest using of universal parameter with accurate physical explanation — the coefficient of volumetric expansion, instead of rather subjective and inaccurate parameter — the swelling coefficient.

Results and discussions. Specimen aging process demonstrates significant changes in the coating, for example heat-protective foam layer formation, which leads to the situation when fire protection system is not effective in ensuring required fire resistance limit under operating conditions. The coefficient of volumetric expansion for the specimen with climatic aging is reduced by more than 40 % when used for six or more years.

Conclusions. The study demonstrates that heat-insulated layer of a fire-retardant coating during operation for more than three years is significantly reduced. The use of thermomechanical analysis method can serve as an additional proof for the effectiveness of fire protection product, both within the framework of construction control and real operating conditions.

Keywords: fire retardant intumescent paints; fire protection efficiency; fire retardant properties; thermal analysis methods; service life

For citation: Eremina T.Yu., Utkin S.V. Study of changes in the properties of fire-retardant coatings of intumescent type by thermomechanical analysis method. *Pozharovzryvbezopasnost/Fire and Explosion Safety*. 2024; 33(2): 32-41. DOI: 10.22227/0869-7493.2024.33.02.32-41 (rus).

✉ Sergey Vyacheslavovich Utkin, e-mail: utkin.s.v@78.mchs.gov.ru

Введение

В современных условиях для возведения зданий и сооружений все чаще применяются стальные конструкции; при всех своих достоинствах они имеют существенный недостаток — низкий предел огнестойкости, который компенсируется применением средств огнезащиты.

В соответствии с требованиями Технического регламента о требованиях пожарной безопасности¹ идентификация здания, сооружения, производственного объекта проводится путем установления их соответствия следующим существенным признакам. В том числе степени огнестойкости, которая в свою очередь определяется на основании пределов огнестойкости конструктивных элементов объекта, отвечающих за конструктивную целостность и устойчивость здания при пожаре.

В настоящий момент сложилась устойчивая тенденция, что средства огнезащиты для стальных конструкций, обращающиеся на рынке, имеют подтверждение соответствия в соответствии с требованиями ТР ЕАЭС 043/2017², а именно показатели огнезащитной эффективности. При этом необходимо отметить, что понятие огнезащитная эффективность ни коим образом не коррелируется с показателями предела огнестойкости конструкции с нанесенным на нее средством огнезащиты.

Данное положение закреплено в ГОСТ Р 53295–2009³, содержащем методы определения огнезащитной эффективности. Таким образом, показатель огнезащитной эффективности, без подтверждения пределов огнестойкости конструкции с нанесенным средством огнезащиты в соответствии с требованиями ГОСТ 30247⁴, лишь способствует введению в заблуждение конечного потребителя средства огнезащиты. Анализ технической документации на различные средства огнезащиты показывает, что производители огнезащитных материалов игнорируют требования ГОСТ Р 53295–2009³ в части недопустимости экстраполяции при построении обобщенной зависимости толщины огнезащитного покрытия от приведенной толщины металла для различных значений времени достижения предельного состояния конструкции с конкретным средством огнезащиты.

Огнезащита металлических конструкций является одной из актуальных проблем повышения огнестойкости сооружений, для чего в настоящее время применяются огнезащитные вспучивающиеся материалы, которые имеют ограниченный срок службы.

Изучение изменения свойств средств огнезащиты для повышения пределов огнестойкости стальных конструкций является одним из перспективных направлений. Целью исследования является апробирование метода термомеханического анализа для оценки

¹ Федеральный закон от 22 июля 2008 года № 123-ФЗ «Технический регламент о требованиях пожарной безопасности».

² Технический регламент Евразийского экономического союза «О требованиях к средствам обеспечения пожарной безопасности и пожаротушения» (ТР ЕАЭС 043/2017).

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

⁴ ГОСТ 30247.0–94. Конструкции строительные. Методы испытаний на огнестойкость.

сохранности огнезащитных свойств огнезащитной системы в ходе ее эксплуатации.

Для оценки огнестойкости стальных конструкций с огнезащитными вспучивающимися красками необходимо учитывать специфику их использования на различных стадиях жизненного цикла создания и эксплуатации огнезащитной системы.

Авторами предлагается введение нового понятия огнезащитной системы.

Система в общепринятом понятии — это совокупность элементов, находящихся в отношениях и связях друг с другом, которая образует определенную целостность, единство. Средство огнезащиты в свою очередь также представляет из себя систему, состоящую из грунта и последовательно нанесенных слоев средства огнезащиты, а в ряде случаев также финишного покрытия, которое выполняет как декоративные, так и защитные функции.

Строительную конструкцию, на которую предполагается нанесение средства огнезащиты, также необходимо рассматривать как элемент создаваемой огнезащитной системы, так как она обладает рядом свойств, которые необходимо учитывать при выборе средства огнезащиты, способа и условий нанесения. Нередко конструкции в ходе нормальной эксплуатации подвержены вибрационным нагрузкам, что приводит к растрескиванию огнезащитного покрытия, а в ряде случаев к его обрушению, при этом представленные на рынке средства огнезащиты не имеют подтвержденных данных о возможности эксплуатации в данных условиях, как в принципе и данных о возможности эксплуатации в различных климатических условиях с сохранением огнезащитной эффективности. Таким образом, конструкции, средства огнезащиты, способ нанесения и условия эксплуатации созданного покрытия являются взаимосвязанными элементами одной системы, имеющей цель обеспечения предела огнестойкости конструкции при определенных условиях эксплуатации на определенный период эксплуатации, что отвечает общепринятому понятию — система.

Любая система существует на протяжении ряда жизненных циклов: от создания до вывода из эксплуатации. В настоящий момент нормативные документы предъявляют достаточно абстрактные требования к разработке проектов огнезащиты, не учитывающие принципы системы. С точки зрения общей теории систем, проект является одной из стадий жизненного цикла создания системы. Именно на этой стадии происходит формирование целей системы, определяются задачи для достижения цели, осуществляется планирование, разработка и контроль выполнения задач, направленных на достижение определенных целей и получение результата. По своей сути проект представляет собой набор инструкций для каждого последующего жизненного цикла функционирования системы: выбор мате-

риала, способ нанесения, способы и методы контроля при производстве работ и при вводе системы в эксплуатацию, порядок эксплуатации и контроль параметров функционирования, условия и порядок ремонта, условия и порядок вывода из эксплуатации. Введение понятия огнезащитная система позволит сформулировать требования к ее созданию и эксплуатации на основе общепринятых требований, предъявляемых к функциональным системам, связанным с безопасностью зданий и сооружений, позволит идентифицировать нарушения функций системы в зависимости от жизненного цикла. Что в свою очередь должно способствовать повышению ответственности производителей средств огнезащиты, производителей огнезащитных работ и проектантов перед конечным потребителем.

Термин «огнезащитная система» применяется в ряде зарубежных стандартов и руководствах по качеству.

Теоретические основы

Актуальным вопросом является изучение свойств вспучивающихся огнезащитных красок для повышения огнестойкости стальных конструкций, основанное на методах термического анализа.

В последнее время многие исследователи отмечают, что на строительном рынке Российской Федерации неуклонно растет количество тонкослойных огнезащитных материалов вспучивающегося типа для обеспечения предела огнестойкости стальных конструкций, но при этом значительная часть данных материалов не может обеспечить достижения целей, для которых они созданы, а именно: обеспечить требуемый предел огнестойкости.

Известно, что оценка огнестойкости стальных конструкций производится на основании имеющихся экспериментальных данных по аналогичным конструкциям или на основании экспериментальных данных характеристики огнезащитных вспучивающихся красок.

Результаты сертификационных и дополнительных испытаний оформляются в виде таблиц или номограмм, в которых указывается минимальная толщина огнезащитного покрытия, необходимая для обеспечения заданного предела огнестойкости стальных конструкций в зависимости от приведенной толщины металла и критической температуры, полученной по результатам статического расчета.

Такой подход в проектировании огнезащиты, когда толщина огнезащитного вспучивающегося покрытия определяется только по рассчитанной критической температуре и приведенной толщине металла, имеет существенный недостаток, а именно, расчетные толщины вспучивающихся покрытий определяются на основании стандартных условий сертификационных испытаний, в частности на основе результатов, достигнутых в условиях воздействия стандартного температурного режима в рамках предписываемого

подхода к проектированию. Затем результаты, полученные в стандартных условиях, распространяются на все температурные режимы пожаров без детального изучения их влияния на поведение вспучивающихся огнезащитных покрытий. Такое допущение в проектировании огнезащиты стальных конструкций создает представление о неизменяемости теплотехнических свойств вспучивающихся покрытий в различных условиях температурного режима пожара. Однако вспучивающиеся покрытия являются химически активными материалами, и их теплотехнические свойства зависят не только от температуры, но также от условий нагрева, типа воздействия огня, механической нагрузки и условий эксплуатации [1, 2].

Одним из самых эффективных способов для защиты стальных конструкций при пожаре являются тонкослойные вспучивающиеся покрытия, способные увеличиваться многократно при нагревании. Вспучивающиеся покрытия представляют собой композиционные материалы, включающие полимерное связующее и наполнители (интумесцентную систему, инертные наполнители и стабилизаторы вспененного угольного слоя). В России большое внимание уделяется исследованию влияния физико-химических процессов огнезащитных составов на огнезащитные свойства [3–6].

При вспучивании и одновременном обугливание происходят различные физико-химические процессы с образованием мелкоячеистого по структуре слоя, обладающего низкой теплопроводностью, в результате чего резко замедляется прогрев металлических конструкций. Каждый компонент рецептуры вспучивающегося покрытия должен быть тщательно подобран, после чего проводится оценка его влияния на огнезащитные свойства. На основании теоретических и экспериментальных исследований огнезащитных вспучивающихся покрытий можно выделить основные типы обязательных ингредиентов такого рода составов. Ингредиенты составов классифицируются в соответствии с функциональным вкладом каждого из них в процесс термолитического синтеза вспучивающихся огнезащитных покрытий. Среди ингредиентов выделяют: доноры кислоты (фосфаты аммония), коксообразователи (пентаэритрит, целлюлоза, крахмал, декстрин), порофоры (меламин, мочевины, гуанидин, хлорпарафины) и полимерное связующее [7–9].

Известно, что важную часть рецептуры огнезащитного вспучивающегося покрытия составляет связующее (смола или пленкообразователь). Основная задача связующего — обеспечить качественную адгезию с подложкой, эластичность, твердость, срок и условия эксплуатации. Перечисленные физико-химические показатели в комплексе позволяют получить качественное, бездефектное, долговечное огнезащитное покрытие и оказывают прямое влия-

ние на огнезащитные свойства⁵ [10]. Поэтому одним из актуальных вопросов является исследование свойств связующего. В качестве связующего применяют либо синтетические, либо модифицированные разными способами природные вещества — в зависимости от области применения или от желаемого типа краски. Связующие представляют собой твердые или жидкие полимеры, которые растворяются или диспергируются в растворителе или воде. По мере высыхания связующего образуется лакокрасочная пленка. Процесс высыхания может происходить физическим или химическим способом. Как правило, высыхание и полимеризация связующего ведутся смешанным процессом. Под физическим процессом подразумевается высыхание связующего без химической реакции, например, в результате испарения растворителей. В случае химического высыхания затвердевание происходит за счет химической реакции. Покрытие может формироваться, например, под воздействием кислорода воздуха или в результате реакции с отвердителем. Основные типы связующих, применяемые в рецептурах огнезащитных вспучивающихся покрытий, — это ПВАД (поливинилацетатная дисперсия), жидкое стекло, акриловая дисперсия, акриловая смола, сополимеры акриловых смол, каучуковые, эпоксидные, перхлорвиниловые, силиконовые смолы. В литературных источниках приведено множество стандартных исследований, но очень мало по термодинамике, где рассматривается влияние природы связующего и его работы при определенном соотношении антипиренов на конечные свойства покрытия [11–13].

Практика показывает, что не уделяется внимание рецептурным составам и исследованию влияния термодинамики и термомеханики на огнезащитные свойства. Авторы предлагают включать в проекты по огнезащите не только технические решения, но и особенности огнезащитных вспучивающихся покрытий с учетом исследования их термомеханики. На практике исследования пожаров, происшедших на территории Санкт-Петербурга, известны случаи, когда деформация и обрушение несущих конструкций здания произошло через 18 мин после начала пожара. Здание, в котором произошел пожар, II степени огнестойкости, было возведено по каркасной схеме с применением стальных конструкций, подвергнутых огнезащитной обработке с применением тонкослойных средств огнезащиты. С учетом принятых проектных решений и требований нормативных документов по пожарной безопасности предел огнестойкости несущих конструкций здания, влияющих на его конструктивную целостность и неизменяемость, дол-

⁵ Eremina T., Korolchenko D., Kuznetsova I. Features of Properties of the Fireproof Paint during the Operation. World Multidisciplinary Civil Engineering Architecture Urban Planning Symposium, 2019. URL: <https://www.wmcaus.org/archive.html>

жен быть не менее 90 мин. В ходе проведения пожарно-технического исследования было установлено, что огнезащитные работы по повышению предела огнестойкости строительных конструкций на объекте пожара были выполнены около 6 лет назад до момента пожара. При этом собственник объекта регулярно осуществлял проверку состояния огнезащитной обработки визуальным осмотром для контроля целостности покрытия и измерениями толщины сухого слоя огнезащитного покрытия, что подтверждали соответствующие акты. На основании изложенного примера можно сделать вывод, что примененная огнезащитная система не выполнила свою функцию. Но при этом невозможно сделать объективных и достоверных выводов о соответствии примененной огнезащитной системы функциональным характеристикам, предъявляемым нормами технического регулирования, а также конкретизировать, на какой стадии жизненного цикла созданная огнезащитная система утратила свои функциональные характеристики, подтвержденные соответствующим сертификатом.

Отсутствие нормативных требований к контролю функциональных характеристик систем противопожарной защиты, в том числе и огнезащитных систем на различных стадиях жизненного цикла, включая производство, транспортировку, проектирование, применение и эксплуатацию, создает условия, способствующие избежать ответственности в случае наступления трагических последствий, связанных с пожаром, в ходе развития которого созданная система противопожарной защиты не выполнила свои функции. Производитель материала может всегда сослаться, что были нарушены условия транспортировки, хранения или нанесения произведенных им компонентов системы. А производитель работ будет ссылаться на некачественно поставленный материал, нарушения условий транспортировки или ненадлежащие условия эксплуатации созданной им системы. Создается замкнутый круг, где все негативные последствия техногенной катастрофы ложатся на плечи добросовестного приобретателя услуг, который в полной мере полагался на добросовестность производителя материала, так как материал имеет все атрибуты, подтверждающие возможность его применения, а также добросовестность производителя работ, чья компетентность подтверждена соответствующей лицензией на производство данного вида работ.

Необходимо отметить, что большинство производителей средств огнезащиты в технической документации указывают необоснованные сроки эксплуатации огнезащитных систем при достаточно экстремальных климатических факторах. При этом указанные сроки эксплуатации средства огнезащиты по сохранению огнезащитных свойств не подтверждены экспериментальными данными, также срок службы средства огнезащиты в определенных условиях эксплуатации является важным эко-

номическим аспектом применения средства огнезащиты для реализации объектов капитального строительства.

В лучшем случае производитель указывает срок службы огнезащитного покрытия на основании результатов испытаний, проведенных по ГОСТ 9.401⁶, определяющему методы проведения ускоренных климатических испытаний для лакокрасочных покрытий, при этом данный стандарт не распространяется для проведения испытаний лакокрасочных покрытий специального назначения, к которым относятся средства огнезащиты. Тем самым вводя в заблуждения конечного потребителя, так как методы, предусматриваемые данным стандартом, рассматривают лишь сохранение декоративных свойств покрытия в зависимости от условий эксплуатации и не рассматривают сохранения огнезащитных свойств.

При этом проблематика контроля качества огнезащитных работ и оценки функциональных характеристик систем обеспечения пожарной безопасности характерна преимущественно для Российской Федерации и государств постсоветского пространства. В частности, она неоднократно излагалась в исследованиях и научных публикациях специалистов Украины и Беларуси. При проведении ряда исследований отмечается существенное изменение огнезащитных свойств тонкослойных вспучивающих покрытий в зависимости от сроков и условий эксплуатации и рассматриваются различные подходы к методам контроля сохранения огнезащитных свойств применяемых материалов в зависимости от сроков эксплуатации⁷ [14–16].

Введение в нормативные документы по пожарной безопасности требования о проведении идентификации средств огнезащиты как при проведении испытаний по огнезащитной эффективности, так и производстве огнезащитных работ методами синхронного термического анализа в соответствии с требованиями ГОСТ Р 53293⁸, должно было улучшить ситуацию с контролем качества огнезащитных работ, но до настоящего момента не создана база образцов идентификаторов, производители в большинстве случаев отказывают в предоставлении сведений об идентификации средства огнезащиты или предоставляют протоколы проведения идентификации, выполненные в другой интервал времени по сравнению с испытаниями по огнезащитной эффективности, что в свою очередь ставит под сомнение достоверность данных образцов идентификатора. Ряд исследователей предлагают методы совершенство-

⁶ ГОСТ 9.401–91. Единая система защиты от коррозии и старения. Покрытия лакокрасочные. Общие требования и методы ускоренных испытаний на стойкость к воздействию климатических факторов.

⁷ Колтачилов В.Л., Сыслова М.Г., Якунович А.Г. Изучение процессов старения вспучивающихся огнезащитных покрытий. URL: http://www.itmo.by/pdf/mif_2008_ru/Section202/2-17.pdf

⁸ ГОСТ Р 53293–2009. Пожарная опасность веществ и материалов. Материалы, вещества и средства огнезащиты. Идентификация методами термического анализа.

вания методики проведения испытаний при идентификации средств огнезащиты методами термического анализа [17].

В ряде исследований предлагается определение характеристик терморасширения материалов интумесцентного типа применять наряду со стандартными методами термического анализа, методами по определению коэффициентов линейного и объемного терморасширения и предельного давления вспучивания при выбранных режимах нагрева [18].

Методы и организация исследования

Исследуемые образцы средств огнезащиты были предварительно подвержены воздействию климатических факторов (искусственное старение — 3, 6 и 9 лет в климатических камерах по ГОСТ 9.401–91⁵, метод 15). Также проведено исследование исходных образцов, не подверженных климатическим факторам (далее — несостаренный образец). В ходе ранее проведенных исследований методами оптической и сканирующей электронной микроскопии изучены внешний вид, морфология включений и микроструктура поверхности образцов покрытия. Проведены исследования фазового и структурного состояния методами рентгенодифракционного анализа и ИК-спектроскопии, а также измерение коэффициента вспучивания огнезащитного покрытия, в ходе которого были получены результаты: в результате старения образцов происходит постепенное изменение их фазового состава, вызванное уменьшением содержания меламина на 40 %, полифосфата аммония на 15 %, а также перераспределение других компонентов в системе, в результате чего меняется микроструктура покрытия и его защитные свойства [19, 20].

Для проведения исследования с каждой из подготовленных пластин были отобраны образцы сухого слоя огнезащитного материала, максимально одинаковых геометрических параметров, с разной навеской 0,2; 0,3; 0,4; 0,5 г соответственно, в общей сложности для исследования было подготовлено 108 образцов трех исследуемых образцов средств огнезащиты.

На начальном этапе был выполнен ряд опытов с различной массой образцов и варьированием нагрузки от 1 до 4Н. Выбор параметров навески образцов и варьирование нагрузки проводились до момента достижения корреляции результатов термоаналитических кривых термомеханического анализа (ТМА) и термоаналитических кривых термогравиметрии (ТГ) съемки в одинаковых диапазонах температур исследуемых образцов средств огнезащиты.

Термоаналитическая кривая ТМА — кривая, образца навеской 5 мг с механической нагрузкой 3Н, представленная на рис. 1, имеет три ярко выраженных перегиба, а соответствующая производная — три ярко выраженных экстремума. Аналогичная закономерность наблюдается и на ТГ-кривой исследуемых материалов.

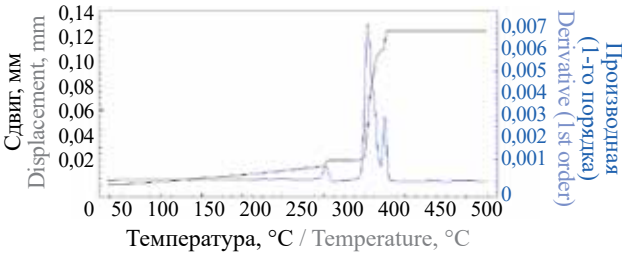


Рис. 1. ТМА-кривые несостаренного образца огнезащитного материала

Fig. 1. TMA curves of an unaged specimen of fire-retardant material

Наблюдается корреляция в одинаковых диапазонах температур изменения массы образца и изменения его объема.

Таким же образом можно обосновать и выбранную скорость нагрева. Суммарные параметры эксперимента представлены в таблице.

Удельное расширение для исследуемых образцов рассчитывалось следующим образом.

Поскольку dilatometer представляет собой цилиндрический сосуд с поршнем, вычисление удельного объемного расширения сводится к измерению объема цилиндра. Объем цилиндра может быть вычислен по уравнению:

V = \frac{\pi d^2 h}{4}, \tag{1}

где d — диаметр поршня;
h — высота.

Так как в нашем эксперименте будет фиксироваться только линейное смещение зонда анализатора, а нам требуется вычислить изменение объема, поэтому в (1) требуется подставить эти параметры:

\Delta l = \frac{\Delta V}{1/4 \pi d^2}, \tag{2}

где \Delta l — линейное смещение зонда;
\Delta V — изменение объема цилиндра (объемное смещение).

Параметры ТМА измерения
TMA measurement parameters

Скорость сканирования Scan speed	20 °C/мин 20 °C/min
Диапазон сканирования Scan range	30–500 °C
Тип нагрузки Load type	Механический Mechanical
Значение нагрузки Load value	3Н
Инертный материал Inert material	Al ₂ O ₃
Атмосфера Atmosphere	Воздух Air

Поскольку изменение объема материала происходит при нагреве от температуры T_1 до T_2 , то объемное смещение можно вычислить по уравнению:

$$\Delta V_{T_1 \rightarrow T_2} = \frac{\pi d^2}{4} (\Delta l_1 - \Delta l_2), \quad (3)$$

где Δl_1 — линейное смещение зонда при температуре T_1 ;

Δl_2 — линейное смещение зонда при температуре T_2 .

В свою очередь удельное расширение при изменении температуры от T_1 до T_2 можно вычислить по уравнению:

$$\Delta \tilde{V} = \frac{\Delta V_{T_1 \rightarrow T_2}}{m} = \frac{\pi d^2 (\Delta l_1 - \Delta l_2)}{4m}, \quad (4)$$

где m — масса образца.

Результаты и их обсуждение

В ходе проведения исследования образцов средств огнезащиты методом ТМА были получены данные по выбору оптимальных условий проведения эксперимента.

Проведенное исследование методом термомеханического анализа на термомеханическом анализаторе марки «ТМА 4000» фирмы «Perkin Elmer» позволяет выполнять съемку в различной атмосфере: как в инертной (N_2 , Ar, He), так и в окислительной (O_2 или воздух). Поскольку основной задачей, решаемой в рамках данной работы, является изучение объемного расширения огнезащитных материалов, было принято решение выполнять эксперимент в условиях, близких к реальным, т.е. использовать в качестве атмосферы воздух.

Для того чтобы подобрать оптимальную механическую нагрузку, был выполнен ряд опытов с применением различной нагрузки, в ходе исследования установлено, что проведение эксперимента с приложением нагрузки 4Н приводит к снижению чувствительности эксперимента: снижается значение линейного расширения поршня дилатометра, кривая имеет более пологий наклон. Следовательно, значение механической нагрузки, равное 4Н, слишком велико для проводимых экспериментов.

Термоаналитическая кривая, полученная при эксперименте при нагрузке в 1Н, имеет достаточно низкое разрешение, регистрируемые эффекты не картируются с эффектами, регистрируемыми на кривой ТГ аналогичного образца средства огнезащиты, при этом кривая имеет высоту, совпадающую с высотой кривой при нагрузке в 3Н.

Соответственно, наиболее оптимальной будет нагрузка в 3Н, при которой регистрируются все значимые эффекты, картирующиеся с эффектами термоаналитической кривой ТГ, отражающей все особенности исследуемых процессов.

В ходе экспериментов с различной массой образца было установлено, что при массе образца менее 3 г термоаналитическая кривая имеет достаточно низкое разрешение и не отражает значимые эффекты, отражающие особенности происходящих процессов. При массе образца более 5 г исследуемый материал и Al_2O_3 высыпаются из дилатометра. В случае слишком большой навески такой эксперимент не может дать объективную информацию из-за неверной передачи размера.

Учитывая, что различные средства огнезащиты в зависимости от рецептуры и особенностей технологии производства изначально имеют различные параметры удельного теплового расширения (рис. 2), по мнению исследователей, оптимально масса образца для проведения термомеханического исследования должна составлять от 3 до 5 г в зависимости от особенностей исследуемого средства огнезащиты.

При исследовании трех средств огнезащиты методом термомеханического анализа, проведенном на термомеханическом анализаторе марки «ТМА 4000» фирмы «Perkin Elmer», подвергнутых искусственному старению, было рассчитано удельное тепловое расширение в соответствии с предложенным методом. Результаты расчета отображены на рис. 2.

Анализируя полученные данные, можно отметить, что в процессе старения образцов в покрытии происходят существенные изменения, влияющие на формирование теплозащитного пенококсового слоя, что ведет к невозможности созданной огнезащитной системы выполнить свои функции по обеспечению требуемого предела огнестойкости в условиях эксплуатации в течение 6 и более лет.

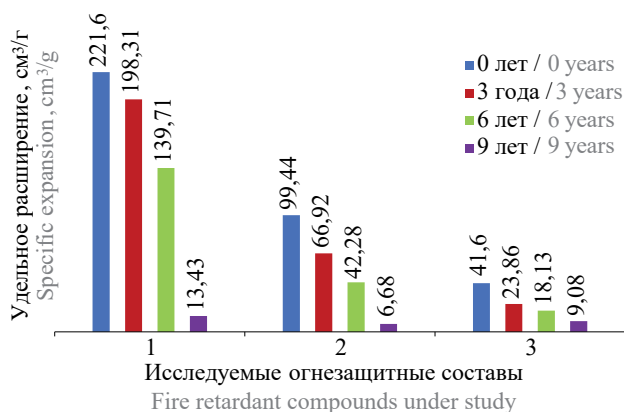


Рис. 2. Результаты определения удельного расширения исследуемых средств огнезащиты в зависимости от сроков эксплуатации

Fig. 2. Results of determining the specific expansion of the studied fire retardants depending on the service life

Выводы

Как показали данные комплексного исследования, в результате климатического воздействия происходят существенные изменения компонентного и структурного состава огнезащитного покрытия. Старение покрытий даже на 3 года приводит к снижению основной функции по формированию теплоизолирующего слоя. В настоящий момент документы по стандартизации в области оценки огнезащитных свойств средств огнезащиты не отвечают основным принципам технического регулирования. Отсутствие стандартизированных методов по подтверждению эксплуатационных свойств средств огнезащиты приводит к введению в заблуждение конечного потребителя, а отсутствие стандартизированных подходов к оценке качества выполняемых (выполненных) работ с применением современных аналитических методов исследования не позволяет своевременно выявить критические несоответствия, влияющие на функциональные характеристики создаваемой огнезащитной системы. В настоящий момент существует необходимость создания нормативного документа, определяющего методы и параметры контроля как процесса производства

средств огнезащиты, так и их применения на примере Европейского документа по оценке⁹.

Также необходимо отметить, что ГОСТ Р 53295–2009³ в существующей редакции утратил свою актуальность и проведение испытаний на крупноформатных образцах для определения огнезащитной эффективности экономически нецелесообразно, использование крупноформатных образцов делает практически невозможным проведение испытаний с учетом климатических условий эксплуатации. Зарубежные и отечественные исследователи, в том числе документ по оценке⁷, указывают, что использование образцов стальных пластин толщиной 5 мм и размером не менее 200 × 300 мм является достаточным условием для определения огнезащитной эффективности средств огнезащиты. При положительном результате испытаний по определению огнезащитной эффективности должны быть проведены испытания по определению пределов огнестойкости конструкций с нанесенным средством огнезащиты. И все результаты испытаний, включая идентификационные характеристики состава с учетом ускоренных климатических испытаний, должны быть доступны конечному потребителю.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Зыбина О.А., Варламов А.В., Чернова Н.С., Мнацаканов С.С. О роли и превращениях компонентов огнезащитных вспучивающихся лакокрасочных композиций в процессе термолиза // Журнал прикладной химии. 2009. Т. 82. № 9. С. 1542–1546. URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=44519592>
2. Халтуринский Н.А., Крупкин В.Г. О механизме образования огнезащитных вспучивающихся покрытий // Пожаровзрывобезопасность/Fire and Explosion Safety. 2011. Т. 28. № 10. С. 33–41. URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=16972927>
3. Зыбина О.А. Теоретические принципы и технология огнезащитных вспучивающихся материалов : дис. ... д-ра техн. наук. 2015. 260 с.
4. Еремина Т.Ю. Моделирование и оценка огнезащитной эффективности вспучивающихся огнезащитных составов // Пожаровзрывобезопасность/Fire and Explosion Safety. 2003. Т. 12. № 5. С. 22. URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/modelirovanie-i-otsenka-ognezashitnoy-effektivnosti-vspuchivayuschih-sostavov>
5. Laoutid F., Bonnaud L., Alexandre M., Lopez-Cuesta J.-M., Dubois Ph. New prospects in flame retardant polymer materials : From fundamentals to nanocomposites // Materials Science and Engineering: R: Reports. 2009. Vol. 63. Issue 3. Pp. 100–125. DOI: 10.1016/J.MSER.2008.09.002
6. Horrocks A.R., Price D. Fire retardant materials. Cambridge : Woodhead Publishing Limited, 2001. 442 p. DOI: 10.1201/9781439823835
7. Зыбина О.А., Бабкин О.Э. О составлении рецептур эффективных огнезащитных лакокрасочных материалов для строительных конструкций // Лакокрасочные материалы и их применение. 2018. № 3. С. 44–47.
8. Troitzsch J. International plastics flammability handbook: principles, regulations, testing and approval. 2nd ed. München : Hanser, 1990. 531 p.
9. Wail Edward D. Fire-protective and flame-retardant coating // Journal of fire sciences. 2011. Vol. 29. Pp. 259–296. DOI: 10.1177/0734904110395469
10. Еремина Т.Ю., Гравит М.В., Дмитриева Ю.Н. Особенности и принципы построения рецептур огнезащитных вспучивающихся композиций на основе эпоксидных смол // Пожаровзрывобезопасность/Fire and Explosion Safety. 2012. № 7. С. 52–56. URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=17853456>
11. Беззапонная О.В., Головина Е.В., Мансуров Т.Х., Акулов А.Ю. Применение метода термического анализа для комплексного исследования и совершенствования вспучивающихся огнезащитных составов // Техносферная безопасность. 2017. № 2 (15). С. 3–7. URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=29424922>

⁹ EAD 350402-00-1106. Fire protective products. Reactive coatings for fire protection of steel elements.

12. Kalafat K., Taran N., Plavan V., Bessarabov V., Zagoriy G., Vakhitova L. Comparison of fire resistance of polymers in intumescent coatings for steel structures // *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*. 2020. Vol. 4. No. 10. Pp. 45–54. DOI: 10.15587/1729-4061.2020.209841
13. Korolchenko D., Eremina T., Minailov D. New method for quality control of fire protective coating // 3RD World multidisciplinary civil Engineering, Architecture, Urban planning Symposium, wmcaus 2018, session 10 prague, 18–22 июня 2018 г. DOI: 10.1088/1757-899x/471/11/112016
14. Шмакова О.А. Способы исследования эффективности огнезащитных покрытий металлоконструкций в условиях эксплуатации с течением времени // Гражданская оборона на страже мира и безопасности : мат. V Междунар. науч.-практ. конф., посвящ. Всемирному дню гражданской обороны : в 4 ч. Ч. III. Проблемы. М., 2021. С. 72–79.
15. Кузнецова Т.А. Определение срока службы огнезащитных покрытий // *Науковий вісник УкрНДІПБ*. 2007. № 2. С. 125–128.
16. Мартынов А.В., Греков В.В., Попова О.В. Некоторые причины нарушения качества интумесцентных покрытий // *Безопасность труда в промышленности*. 2020. Т. 11. С. 69–75. DOI: 10.24000/0409-2961-2020-11-69-75
17. Беззапонная О.В., Штеба Т.В. Совершенствование методики проведения испытаний при идентификации огнезащитных составов методами термического анализа // *Современные проблемы обеспечения безопасности : сб. мат. XXV Междунар. науч.-практ. конф.* Екатеринбург, 2023. С. 179–183.
18. Нагановский Ю.К. Определение характеристик терморасширения материалов интумесцентного типа // *Актуальные вопросы пожарной безопасности*. 2019. № 2. С. 12–18.
19. Умрихина М.Ю., Шорохова Т.О., Пьянкова Л.А., Кудрявцев А.А., Уткин С.В. Исследование старения огнезащитных вспучивающихся покрытий методами СЭМ, XRD и ИК-спектроскопии // *Пожаровзрывобезопасность/Fire and Explosion Safety*. 2020. Т. 29. № 5. С. 60–70. DOI: 10.22227/PVB.2020.29.05.60-70
20. Умрихина М.Ю., Шорохова Т.О., Уткин С.В., Пьянкова Л.А., Краснова Л.Ю. Исследование огнезащитных вспучивающихся покрытий при их эксплуатации методами рентгенофазового, термического анализов и ИК спектроскопии // *Заводская лаборатория. Диагностика материалов*. 2020. Т. 86. № 3. С. 25–31. DOI: 10.26896/1028-6861-2020-86-3-25-31

REFERENCES

1. Zybina O.A., Varlamov A.V., Chernova N.S., Mnatsakanov S.S. On the role and transformations of components of intumescent fire-retardant paint-and-varnish formulations in the course of thermolysis. *Russian Journal of Applied Chemistry*. 2009; 82(9):1542-1546. URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=44519592> (rus).
2. Khalturinskii N.A., Krupkin V.G. On the mechanism of action of flame retardant bulging coatings. *Pozharovzryvobezopasnost/Fire and Explosion Safety*. 2011; 10:33-41. URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=16972927> (rus).
3. Zybina O.A. *Theoretical principles and technology of fire-retardant intumescent materials : dissertation of the Doctor of Technical Sciences*. 2015; 260. (rus).
4. Eremina T.Yu. Modeling and evaluation of the flame retardant effectiveness of bulging flame retardants. *Pozharovzryvobezopasnost/Fire and Explosion Safety*. 2003; 12(5):22. URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/modelirovanie-i-otsenka-ognezaschitnoy-effektivnosti-vspuchivayuschih-sya-ognezaschitnyh-sostavov> (rus).
5. Laoutid F., Bonnaud L., Alexandre M., Lopez-Cuesta J.-M., Dubois Ph. New prospects in flame retardant polymer materials : From fundamentals to nanocomposites. *Materials Science and Engineering: R: Reports*. 2009; 63(3):100-125. DOI: 10.1016/J.MSER.2008.09.002
6. Horrocks A.R., Price D. *Fire retardant materials*. Cambridge, Woodhead Publishing Limited, 2001; 442. DOI: 10.1201/9781439823835
7. Zybina O.A., Babkin O.E. On the formulation of effective flame retardant paint and varnish materials for building structures. *Paints and varnishes and their application*. 2018; 3:44-47. (rus).
8. Troitzsch Jü. *International plastics flammability handbook: principles, regulations, testing and approval*. 2nd ed. München, Hanser, 1990; 531.
9. Wail Edward D. Fire-protective and flame-retardantcoating. *Journal of fire sciences*. 2011; 29:259-296. DOI: 10.1177/0734904110395469
10. Eremina T.Yu., Gravit M.V., Dmitrieva Yu.N. Features and principles of constructing formulations of fire-retardant intumescent compositions based on epoxy resins. *Pozharovzryvobezopasnost/Fire and Explosion Safety*. 2012; (7):52-56. URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=17853456> (rus).
11. Bezzaponnaya O.V., Golovina E.V., Mansurov T.Kh., Akulov A.Yu. Application of the thermal analysis method for a comprehensive study and improvement of intumescent fire retardant compositions. *Technosphere Safety*. 2017; 2(15):3-7. URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=29424922> (rus).

12. Kalafat K., Taran N., Plavan V. et al. Comparison of fire resistance of polymers in intumescent coatings for steel structures. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*. 2020; 4(10):45-54. DOI: 10.15587/1729-4061.2020.209841
13. Korolchenko D., Eremina T., Minailov D. New Method for Quality Control of Fire Protective Coatings. *3RD World multidisciplinary civil Engineering, Architecture, Urban planning Symposium, wmcaus 2018, session 10 prague*. 2018.
14. Shmakova O.A. Methods for studying the effectiveness of fire-retardant coatings on metal structures under operating conditions over time. *Civil Defense for the Guard of Peace and Security : Materials of the International Scientific and Practical Conference dedicated to World Civil Defense Day: v 4 ch. Ch. III. Problemy*. Moscow, 2021; 72-79. (rus).
15. Kuznetsova T.A. Determining the service life of fire retardant coatings. *Scientific Bulletin UkrNDIPB*. 2007; 2:125-128. (ukr).
16. Martynov A.V., Grekov V.V., Popova O.V. Some reasons for poor quality of intumescent coatings. *Occupational safety in industry*. 2020; 11:69-75. DOI: 10.24000/0409-2961-2020-11-69-75 (rus).
17. Bezzaponnaya O.V., Shteba T.V. Improving test methods for identifying fire retardant compositions using thermal analysis methods. *Modern problems of security : collection of materials of the XXV International Scientific and Practical Conference*. Ekaterinburg, 2023; 179-183.
18. Naganovskii Yu.K. Determination of thermal expansion characteristics of intumescent materials. *Current issues of fire safety*. 2019; 2:12-18. (rus).
19. Umrikhina M.Yu., Shorokhova T.O., P'yankova L.A., Kudryavtsev A.A., Utkin S.V. Study of the aging of fire-retardant intumescent coatings using SEM, XRD and IR spectroscopy. *Pozharovzryvobezopasnost/Fire and Explosion Safety*. 2020; 29(5):60-70. DOI: 10.22227/PVB.2020.29.05.60-70
20. Umrikhina M.Yu., Shorokhova T.O., Utkin S.V., Pyankova L.A., Krasnova L.Yu. Study of fire-retardant intumescent coatings during their operation using X-ray diffraction, thermal analysis and IR spectroscopy methods. *Factory Laboratory. Diagnostics of materials*. 2020; 86(3):25-31. DOI: 10.26896/1028-6861-2020-86-3-25-31

Поступила 19.12.2023, после доработки 12.02.2024;

принята к публикации 11.03.2024

Received December 19, 2023; Received in revised form February 12, 2024;

Accepted March 11, 2024

Информация об авторах

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

УТКИН Сергей Вячеславович, начальник лаборатории, Судебно-экспертное учреждение Федеральной противопожарной службы «Испытательная пожарная лаборатория» по городу Санкт-Петербургу», Россия, 197046, г. Санкт-Петербург, ул. Пеньковская, 6; РИНЦ ID: 1085392; ORCID: 0000-0003-4086-7154; e-mail: utkin.s.v@78.mchs.gov.ru

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

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Information about the authors

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

Sergey V. UTKIN, Head of Laboratory, Forensic Expert Institution of the Federal Fire Service "Fire Test Laboratory" for the city of Saint Petersburg", Penkovaya St., 6, Saint Petersburg, 197046, Russian Federation; ID RISC: 1085392; ORCID: 0000-0003-4086-7154; e-mail: utkin.s.v@78.mchs.gov.ru

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

The authors declare no conflicts of interests.

Численное моделирование задымления помещений при пожаре с учетом различных типов пожарной нагрузки

Сергей Викторович Пузач, Сергей Петрович Калмыков ✉

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

АННОТАЦИЯ

Введение. Согласно действующим методическим рекомендациям в области проектирования и расчета параметров систем противодымной защиты зданий и сооружений как в России, так и других странах для определения расхода выделяющегося при пожаре дыма в помещениях, который необходимо удалять системами вытяжной противодымной вентиляции, применяются зависимости, основанные на тепловой мощности очага пожара. На процесс задымления помещения и его скорость при пожаре, кроме низшей теплоты сгорания и удельной скорости выгорания, могут повлиять такие характеристики пожарной нагрузки, как дымообразующая способность, выход токсичных продуктов горения и т.п.

Цели и задачи. Целью работы является проверка предположения о влиянии характеристик пожарной нагрузки, не входящих в величину тепловой мощности очага пожара, на процесс задымления помещения.

Методы исследования. Для оценки задымленности помещений при пожаре с учетом различных типов пожарной нагрузки применялись методы компьютерного моделирования при помощи программного комплекса Fire Dynamics Simulator.

Результаты и их обсуждение. Представлены результаты моделирования динамики дальности видимости, температуры и плотности дыма в помещениях площадью 100 и 200 м² при пожаре с учетом различных типов пожарной нагрузки, участвующей в горении.

Выводы. Качественные отличия времени от начала пожара до потери видимости, динамики оптической плотности дымогазовоздушной среды, а также отличия площади задымления помещений свидетельствуют о существенной дифференцированности процесса задымления помещений в зависимости от свойств горючей нагрузки, участвующей в пожаре.

Выявленное влияние характеристик пожарной нагрузки, не входящих в величину тепловой мощности очага пожара, на процесс задымления помещения требует проведения дополнительных исследований по оценке эффективности работы систем дымоудаления из помещений с учетом результатов, полученных в настоящей статье.

Ключевые слова: дым; оптическая плотность дыма; опасные факторы пожара; дальность видимости; расход дыма; противодымная вентиляция

Для цитирования: Пузач С.В., Калмыков С.П. Численное моделирование задымления помещений при пожаре с учетом различных типов пожарной нагрузки // Пожаровзрывобезопасность/Fire and Explosion Safety. 2024. Т. 33. № 2. С. 42–49. DOI: 10.22227/0869-7493.2024.33.02.42-49

✉ Калмыков Сергей Петрович, e-mail: k_sp@bk.ru

Numerical modelling of smoke condition of premises in case of fire taking into account different types of fire load

Sergey V. Puzach, Sergey P. Kalmykov ✉

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. According to the current methodological recommendations in the field of design and calculation of parameters of smoke protection systems for buildings and structures, both in Russia and other countries, to determine the flow rate of smoke emitted during a fire in the premises, which must be removed by exhaust smoke ventilation systems, dependencies based on the thermal power of the fireplace are used. The process of smoke formation in a room and its rate during a fire, in addition to the lower calorific value and specific burnout rate, can be affected by such characteristics of the fire load as smoke-forming ability, the release of toxic combustion products, etc.

Goals and objectives. The purpose of the work is to verify the assumption about the influence of fire load characteristics, which are not included in the value of the thermal power of the fire centre, on the process of smoke formation in the room.

Research methods. To assess the smoke content of premises during a fire, taking into account various types of fire load, computer modelling methods were used using the Fire Dynamics Simulator software package.

Results and its discussion. The results of modelling the dynamics of temperature, density and smoke visibility in rooms with an area of 100 and 200 m² during a fire are presented, taking into account various types of fire load involved in combustion.

Conclusions. Qualitative differences in the time from the beginning of the fire to the loss of visibility, the dynamics of the optical density of the smoke-gas-air environment, as well as differences in the area of smoke in the premises indicate a significant differentiation of the process of smoke in the premises depending on the properties of the combustible load involved in the fire.

The identified influence of the characteristics of the fire load, which are not included in the thermal power of the fire source, on the process of smoke formation in the premises requires additional research to assess the efficiency of smoke removal systems from the premises, taking into account the results obtained in this paper.

Keywords: smoke; smoke optical density; fire hazards; smoke visibility; smoke flow rate; smoke ventilation

For citation: Puzach S.V., Kalmykov S.P. Numerical modelling of smoke condition of premises in case of fire taking into account different types of fire load. *Pozharovzrybobezopasnost'/Fire and Explosion Safety*. 2024; 33(2):42-49. DOI: 10.22227/0869-7493.2024.33.02.42-49 (rus).

✉ Sergey Petrovich Kalmykov, e-mail: k_sp@bk.ru

Введение

«К опасным факторам пожара (далее – ОФП), воздействующим на людей и имущество, относятся:

- 1) пламя и искры;
- 2) тепловой поток;
- 3) повышенная температура окружающей среды [1, 2];
- 4) повышенная концентрация токсичных продуктов горения и термического разложения [3–5];
- 5) пониженная концентрация кислорода [6, 7];
- 6) снижение видимости в дыму»¹.

Дым представляет собой совокупность следующих компонентов [1, 3]:

- частично или полностью окисленные продукты термического разложения [8–10];
- сконденсированные жидкие частицы;
- нагретый воздух, вовлекаемый восходящей конвективной колонкой очага горения.

Таким образом к дыму можно отнести 4 из 6 опасных факторов пожара.

Согласно действующим методическим рекомендациям^{2, 3} в области проектирования и расчета параметров систем противодымной защиты зданий и сооружений [3, 11] как в России, так и других странах⁴ [12] для определения расхода выделяющегося при пожаре дыма в помещениях [11–13], который

необходимо удалять системами вытяжной противодымной вентиляции, применяется формула (1), основанная на тепловой мощности очага пожара:

$$G_k = 0,032 Q_k^{3/2} Z, \quad (1)$$

где G_k — массовый расход продуктов горения, поступающих с конвективной струей в подпотолочный слой, кг/с;

Q_k — конвективная составляющая мощности очага пожара, кВт [14, 15];

Z — высота незадымленной зоны, м.

Использование подобной формулы справедливо в случае расположения очага пожара на полу помещения и попадания пламени очага пожара в область подпотолочного слоя дыма. Для расчета расхода удаляемого дыма из помещений достаточно большой высоты, таких как многосветные пространства, атриумы, пассажи, зальные помещения, применяется формула³:

$$G_k = 0,071 Q_k^{1/3} Z^{5/3} + 0,0018 Q_k. \quad (2)$$

Кроме того, применяются другие формулы для случаев расположения очага пожара на полу под навесом или балконом или задымления помещения через проем в ограждающих конструкциях.

Конвективная составляющая мощности очага пожара (часть тепловыделения пожара, идущая на нагрев продуктов горения) определяется по формуле^{3, 4}:

$$Q_k = (1 - \varphi) \eta Q_p \psi_{уд} F_r, \quad (3)$$

где φ — доля теплоты, отдаваемой очагом пожара ограждающим конструкциям;

η — коэффициент полноты сгорания;

Q_p — низшая теплота сгорания, кДж/кг;

¹ Технический регламент о требованиях пожарной безопасности : Федеральный закон от 22.07.2008 № 123-ФЗ. URL: http://www.consultant.ru/document/cons_doc_LAW_78699/ (дата обращения: 03.10.2023).

² Расчетное определение основных параметров противодымной вентиляции зданий : метод. рекомендации к СП 7.13130.2013. М. : ВНИИПО, 2013. 58 с.

³ Расчет параметров систем противодымной защиты жилых и общественных зданий : рекомендации. М. : НП АВОК, 2018.

⁴ NFPA 92. Standard for Smoke Control Systems, 2021 Edition. Quincy, MA : NFPA, 2020. 92 p.

$\Psi_{уд}$ — удельная скорость выгорания, кг/(м²·с);

F_r — площадь очага пожара, м².

Если не принимать во внимание площадь очага пожара и ее изменение во времени, которые при проектировании систем противодымной защиты принимаются фиксированными, то на возможную скорость задымления помещения при пожаре, кроме низшей теплоты сгорания и удельной скорости выгорания, могут повлиять такие характеристики пожарной нагрузки, как дымообразующая способность, выход токсичных продуктов горения и т.п. Подобные характеристики приводятся в различных базах данных пожарной нагрузки, в частности [16].

Хотелось бы отметить, что в ранее действующих расчетных рекомендациях [1, 17, 18] массовый расход дыма определялся на основании только периметра очага пожара. Например, по формуле:

$$G = 676,8 P_{\Pi} y^{1,5} K_{ec}, \quad (4)$$

где G — массовый расход дыма, кг/ч;

P_{Π} — периметр очага пожара, м;

y — расстояние от пола до рассматриваемого уровня, м;

K_{ec} — безразмерный коэффициент.

А в еще более ранних источниках⁵ расход дыма вообще принимался исходя из площади пола помещения.

Целью работы является проверка предположения о влиянии характеристик пожарной нагрузки, не входящих в величину тепловой мощности очага пожара, на процесс задымления помещения.

Постановка задачи исследования

Исследование производилось на основе численных экспериментов, а в качестве инструмента был выбран программный комплекс Fire Dynamics Simulator [19, 20], наиболее применяемый и распространенный в России для моделирования пожаров в помещениях.

Численные эксперименты в помещениях различного назначения проводились при условии одинаковой величины конвективной составляющей мощности очага пожара, которая составляла 1 МВт. Относительное отклонение для различных сценариев составляло не более 2 %.

Подобная постановка задачи с точки зрения проектирования противодымной защиты означала абсолютно идентичные условия работы таких систем, т.е. массовый расход удаляемых продуктов горения при пожаре, закладываемый проектировщиками, для всех рассматриваемых сценариев был бы одинаков.

⁵ СНиП II-90–81. Производственные здания промышленных предприятий. М., 1982. 14 с.

Рассматривался процесс задымления в помещениях высотой 3 м и площадью 100 и 200 м². В качестве пожарной нагрузки было выбрано 14 вариантов [16]:

- сценарий № 1 — здания I–II степени огнестойкости; мебель + бытовые изделия;
- сценарий № 2 — здание I–II степени огнестойкости; мебель + ткани;
- сценарий № 3 — здание I степени огнестойкости; мебель + ткани (0,75 + 0,25);
- сценарий № 4 — здание III степени огнестойкости; мебель + ткани (0,75 + 0,25);
- сценарий № 5 — кабинет; мебель + бумага (0,75 + 0,25);
- сценарий № 6 — помещение, облицованное панелями; панели ДВП;
- сценарий № 7 — административное помещение; мебель + бумага (0,75 + 0,25);
- сценарий № 8 — общественные здания; мебель + линолеум ПВХ (0,9 + 0,1);
- сценарий № 9 — библиотеки, архивы; книги, журналы на стеллажах;
- сценарий № 10 — окрашенные полы, стены; дерево + краска РХО (0,9 + 0,1);
- сценарий № 11 — выставочный зал, мастерская; дерево + ткани + краски (0,9 + 0,09 + 0,01);
- сценарий № 12 — зал; 0,5*ДВП + 0,1 (ткань, искусственная кожа ПВХ, ППУ) + 0,2*дерево с покрытием;
- сценарий № 13 — отделка: ковролин;
- сценарий № 14 — мебель + бумага (0,8) + ковровое покрытие (0,2).

С учетом различных типов пожарной нагрузки и площади помещения было проведено 28 численных экспериментов.

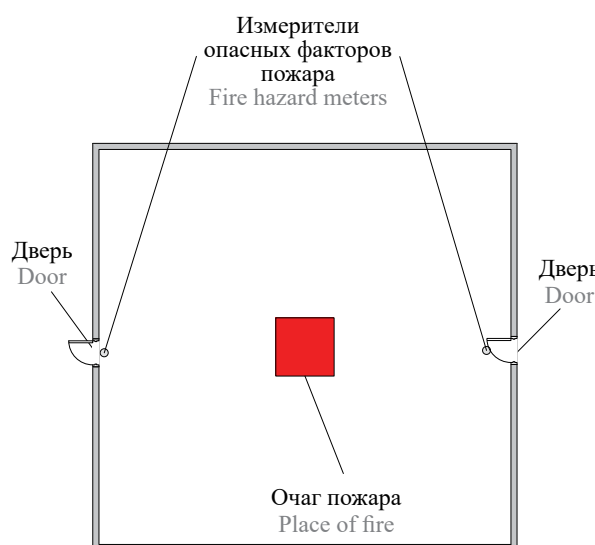


Рис. 1. Схема моделируемого помещения
Fig. 1. Scheme of the modelled room

Очаг пожара располагался в центре помещения и задавался через граничные условия на поверхности как «вентиляционное отверстие». Характеристики пожарной нагрузки принимались по типовой базе горючей нагрузки [16]. В численных экспериментах учитывалась линейная скорость распространения пламени по поверхности очага пожара.

Максимальная площадь очага пожара ограничивались для того, чтобы пиковая мощность тепловыделения во всех сценариях была одинаковой. Расчетная сетка принималась кубической формы с длиной стороны, равной 0,01 м.

На рис. 1 показана схема помещения, в котором моделировался очаг пожара.

В помещении предусмотрены два открытых дверных проема размерами 1×2 м. Перед выходом из помещения в дверных проемах установлены измерители ОФП на высоте 1,7 м.

Результаты исследования

Задымленность помещения оценивалась на основании полей дальности видимости и оптической плотности дымогазовоздушной среды, а также времени от начала пожара до потери видимости в контрольных точках, расположенных вблизи выходов из помещения (рис. 1). Предельно допустимая дальность видимости определялась исходя из эффективного диаметра помещения⁶.

На рис. 2–7 показаны результаты численного моделирования для сценариев № 1, 6 и 9, а именно: поля дальности видимости (см. рис. 2–4) в помещении площадью 100 м^2 на момент времени 50 с

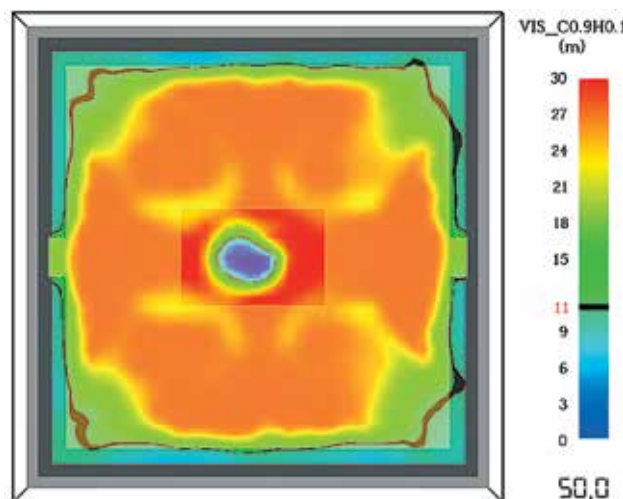


Рис. 2. Поле дальности видимости — сценарий № 1
Fig. 2. Smoke visibility field — Scenario 1

⁶ Об утверждении методики определения расчетных величин пожарного риска в зданиях, сооружениях и пожарных отсеках различных классов функциональной пожарной опасности: Приказ МЧС России от 14 ноября 2022 г. № 1140. URL: <https://www.garant.ru/products/ipo/prime/doc/406477165/> (дата обращения: 03.10.2023).

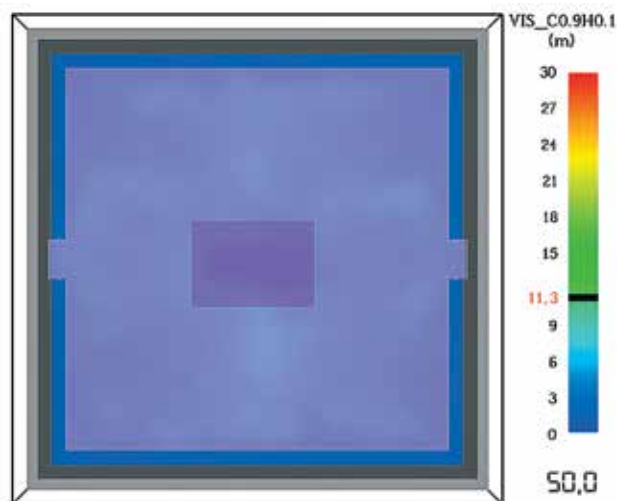


Рис. 3. Поле дальности видимости — сценарий № 6
Fig. 3. Smoke visibility field — Scenario 6

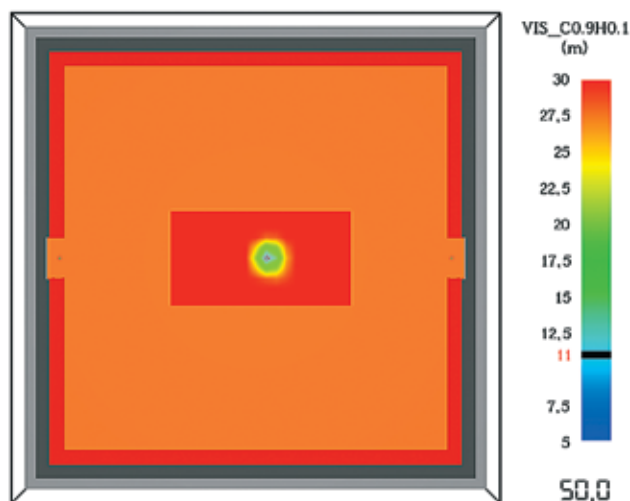


Рис. 4. Поле дальности видимости — сценарий № 9
Fig. 4. Smoke visibility field — Scenario 9

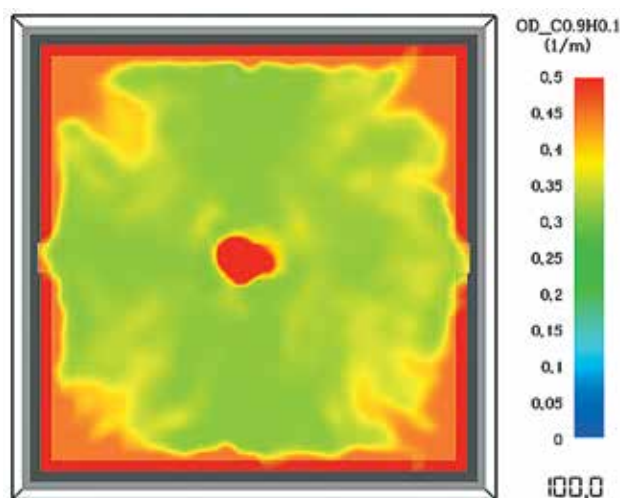


Рис. 5. Поле оптической плотности дымогазовоздушной среды — сценарий № 1
Fig. 5. Smoke optical density field — Scenario 1

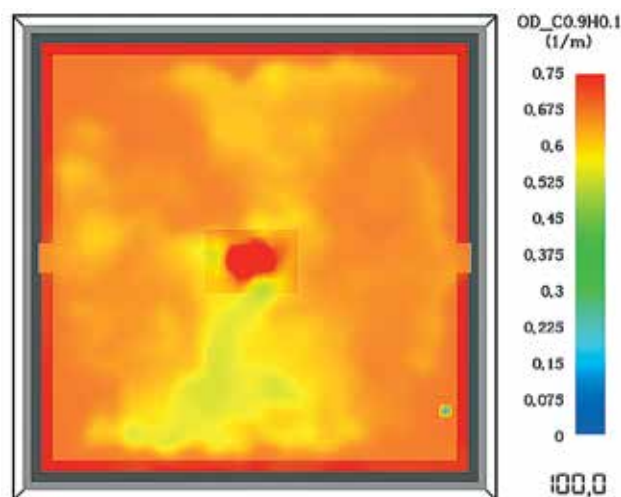


Рис. 6. Поле оптической плотности дымогазовоздушной среды — сценарий № 6

Fig. 6. Smoke optical density field — Scenario 6

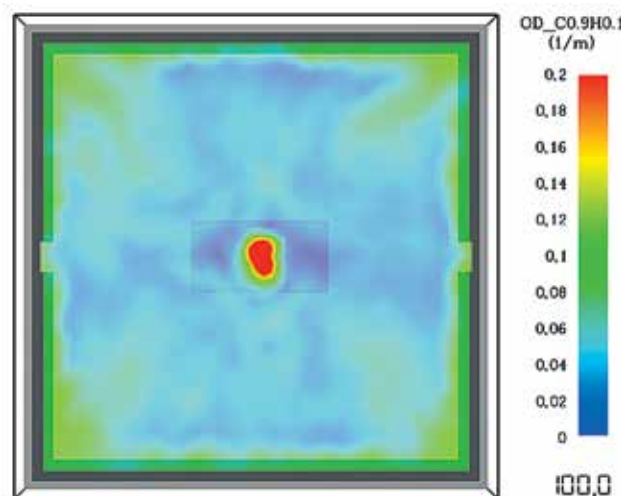


Рис. 7. Поле оптической плотности дымогазовоздушной среды — сценарий № 9

Fig. 7. Smoke optical density field — Scenario 9

от начала пожара и оптической плотности дымогазовоздушной среды (см. рис. 5–7) в помещении площадью 200 м² на момент времени 100 с от начала пожара на уровне 1,7 м от пола помещения. Изменение дальности видимости в контрольных точках перед выходом из помещения в сценариях № 1, 6 и 9 показано на рис. 8 и 9.

Время наступления критического значения ОФП по потере видимости по 28 рассматриваемым сценариям приведено в таблице.

Анализ полученных данных по задымленности помещений, основанных на изменении дальности видимости и оптической плотности дымогазовоздушной среды, а также времени от начала пожара до потери видимости, позволил установить существенное различие этого процесса в рассматриваемых сценариях численных экспериментов. Так, время по потере видимости для сценариев № 6 и 9 отличается более чем

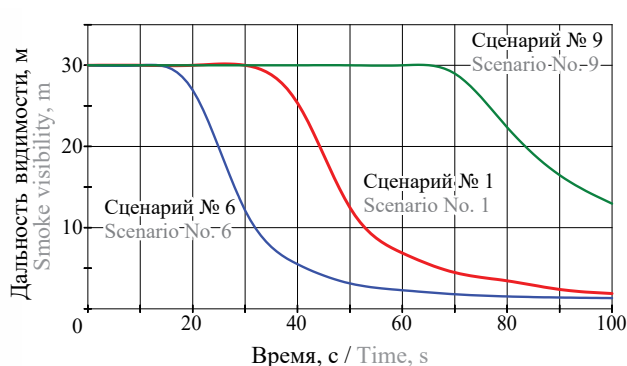


Рис. 8. Изменение дальности видимости в контрольных точках перед выходом из помещения площадью 100 м²

Fig. 8. Changing the visibility range at control points before leaving a room with an area of 100 м²

Результаты численного моделирования
Numerical simulation results

Номер сценария Scenario number	Время от начала пожара до потери видимости в дыму, с Time from the start of the fire to loss of visibility in the smoke, s	
	Площадь помещения 100 м ² Room area 100 м ²	Площадь помещения 200 м ² Room area 200 м ²
1	46,4	47,9
2	68,3	66,7
3	69,6	77,2
4	29,1	26,4
5	35,8	39,1
6	23,4	25,6
7	44,7	47,6
8	73,1	77,1
9	95,1	103,1
10	55,9	56,6
11	63,7	58,6
12	27,6	29,9
13	37,0	35,7
14	32,4	38,4

в 4 раза. Это также наблюдается на картине процесса задымления в этих сценариях. Например, в сценарии № 9 на момент времени 50 с от начала пожара (рис. 4) дальность видимости во всем помещении соответствует начальной. В сценарии № 1 в части помещения к этому же времени уже произошло опускание дымового слоя ниже уровня 1,7 м (см. рис. 2). А в сценарии № 6 (см. рис. 3) дымом полностью заполнена вся верхняя часть помещения.

Кроме того, для определения производительности вентиляционного оборудования систем вытяжной противодымной вентиляции необходимо знать величину объемного расхода удаляемого (выделяющегося) при пожаре дыма.

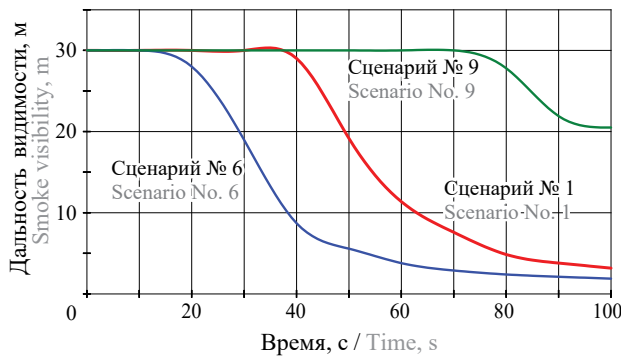


Рис. 9. Изменение дальности видимости в контрольных точках перед выходом из помещения площадью 200 м²

Fig. 9. Changing the visibility range at control points before leaving a room with an area of 200 m²

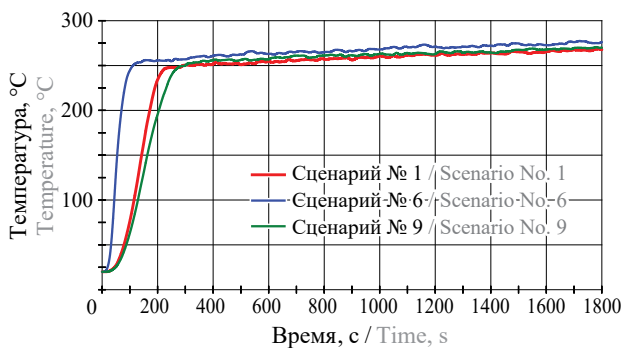


Рис. 10. Изменение среднеобъемной температуры дымового слоя в помещении площадью 100 м²

Fig. 10. Change in the average volumetric temperature of the smoke layer in a room with an area of 100 m²

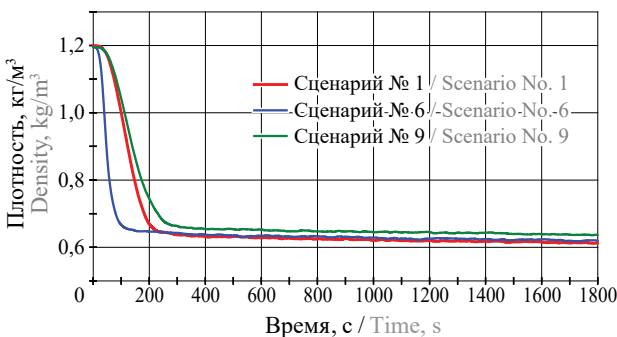


Рис. 11. Изменение среднеобъемной плотности дымового слоя в помещении площадью 100 м²

Fig. 11. Change in the average volume density of the smoke layer in a room with an area of 100 m²

Объемный расход дыма рассчитывается исходя из величины массового расхода дыма и его температуры. Так как массовый расход удаляемых продуктов горения при пожаре, рассчитываемый по современным рекомендациям, для всех рассматриваемых сценариев был одинаков, основываясь на разном значении тепловой мощности очага пожара, то для оценки объемного расхода дыма необходимо знать температуру или плотность дыма.

Изменение среднеобъемной температуры и плотности дымовоздушной смеси в подпотолочном

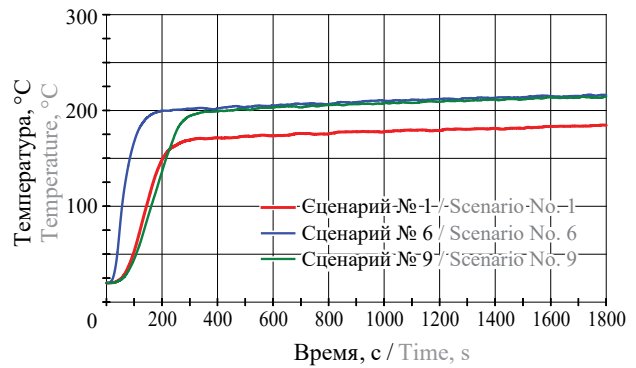


Рис. 12. Изменение среднеобъемной температуры дымового слоя в помещении площадью 200 м²

Fig. 12. Change in the average volumetric temperature of the smoke layer in a room with an area of 200 m²

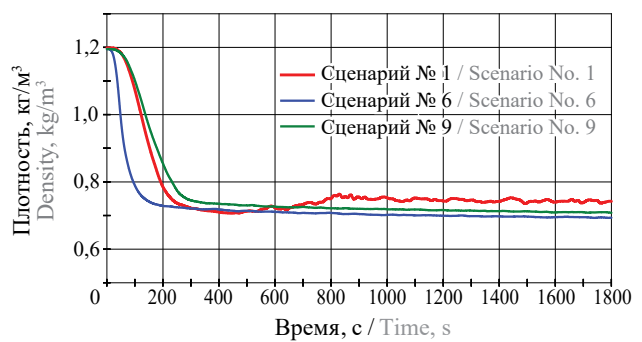


Рис. 13. Изменение среднеобъемной плотности дымового слоя в помещении площадью 200 м²

Fig. 13. Change in the average volume density of the smoke layer in a room with an area of 200 m²

пространстве от уровня 1,7 м до перекрытия представлено на рис. 10–13.

Выводы

Качественные отличия времени от начала пожара до потери видимости, динамики оптической плотности дымовоздушной среды, а также отличия площади задымления помещений свидетельствуют о существенной дифференцированности процесса задымления помещений в зависимости от свойств горючей нагрузки, участвующей в пожаре.

Как упоминалось выше, с точки зрения современного проектирования систем противодымной защиты все рассматриваемые сценарии абсолютно идентичны. Выявленное влияние характеристик пожарной нагрузки, не входящих в величину тепловой мощности очага пожара, на процесс задымления помещения указывает на возможную корректировку подхода, заложенного в основу определения расхода выделяющегося и удаляемого дыма при пожаре в помещении, и требует проведения дополнительных исследований по оценке эффективности работы систем дымоудаления из помещений с учетом результатов, полученных в настоящей статье.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Батчер Е., Парнэлл А. Опасность дыма и дымозащита / пер. с англ. Е.Ш. Фельдмана. М. : Стройиздат, 1983. 153 с.
2. Klote J.H., Milke J.A. Principles of smoke management // American Society of Heating, Refrigerating and Air-Conditioning Engineers & Society of Fire Protection Engineers. Atlanta, 2002.
3. Есин В.М., Калмыков С.П., Панов М.В., Токарев В.Н. Пожарная безопасность в строительстве : уч., в 2 ч. Часть 1. М. : Академия ГПС МЧС России, 2023. 333 с.
4. Пузач С.В., Комаревцев Н.В. Определение уровня токсичности продуктов горения веществ и материалов при пожаре с точки зрения блокирования пути эвакуации // Ройтмановские чтения : сб. мат. XI науч.-практ. конф. г. Москва, 21 марта 2023 г. М. : Академия ГПС МЧС России, 2023. С. 43–46.
5. Мустафин В.М., Пузач С.В. Влияние начальной освещенности и дымообразующей способности на расчетное время блокирования путей эвакуации по потере видимости // Безопасность жизнедеятельности. 2020. № 2 (230). С. 17–22.
6. Багажков И.В., Коноваленко П.Н., Наумов А.В. Дым и его токсичность // Актуальные вопросы естествознания : мат. V Всеросс. науч.-практ. конф. с междунар. участием. Иваново, 24 марта 2020 года. Иваново : Ивановская пожарно-спасательная академия ГПС МЧС России, 2020. С. 13–16.
7. Purser D.A. Toxic combustion product yields as a function of equivalence ratio and flame retardants in under-ventilated fires: bench-large-scale comparisons // Polymers. 2016. Vol. 8 (9). P. 330. DOI: 10.3390/POLYM8090330
8. Su L.-C., Wu X., Zhang X., Huang X. Smart performance-based design for building fire safety: Prediction of smoke motion via AI // Journal of Building Engineering. 2021. Vol. 43 (4). DOI: 10.1016/j.jobbe.2021.102529
9. Khan M.M., Chaos M. Combustion characteristics of materials and generation of fire products. SFPE Handbook of Fire Protection Engineering. 5th ed. 2016. Pp. 1143–1232. DOI: 10.1007/978-1-4939-2565-0_36
10. Cheung W.T., Zeng Ya., Lin Sh., Huang X. Modelling carbon monoxide transport and hazard from smouldering for building fire safety design analysis // Fire Safety Journal. August 2023. Vol. 140. P. 103895. DOI: 10.1016/j.firesaf.2023.103895
11. Есин В.М., Калмыков С.П. Обоснование расхода удаляемого из поэтажных коридоров дыма при пожаре в зданиях повышенной этажности // Пожарная безопасность. 2022. № 3 (108). С. 76–85. DOI: 10.37657/vniipo.pb.2022.46.16.009
12. Klote J.H., Milke J.A., Turnbull P.G., Kashef A., Ferreira M.J. Handbook of smoke control engineering. ASHRAE, 2012. 512 p.
13. Li L., Du F., Yang Y., Wei L., Huang F., Gao Z. et al. Research on the smoke mass flow rate in one-dimensional spreading stage in tunnel with multiple fire sources // Case Studies in Thermal Engineering. 2022. Vol. 31. P. 101801. DOI: 10.1016/j.csite.2022.101801
14. Veloo P., Quintiere J.G. Convective heat transfer coefficient in compartment fires // Journal of Fire Sciences. 2013. Vol. 31 (5). Pp. 410–423. DOI: 10.1177/0734904113479001
15. Mvogo P.O., Samedi O.Z., Changement P., Zaida J.T., Nzie W., Fouda H.E. et al. Investigative Study on Convective Heat Transfer inside Compartment during Fire Situation // Journal of Combustion. 2022. Vol. 2022. 12 p. DOI: 10.1155/2022/6559812
16. Кошмаров Ю.А. Прогнозирование опасных факторов пожара в помещении : учеб. пособие. М. : Академия ГПС МВД РФ, 2000. 119 с.
17. Драйздейл Д. Введение в динамику пожаров / пер. с англ. К.Г. Бомштейна ; под ред. Ю.А. Кошмарова, В.Е. Макарова. М. : Стройиздат, 1990. 424 с.
18. Баркалов Б.В. Основания норм проектирования аварийной противодымной вентиляции // Водоснабжение и санитарная техника. 1990. № 9.
19. McGrattan K., Hostikka S., Floyd J., McDermott R., Vanella M. NIST Special Publication 1018-1. 6th ed. Fire Dynamics Simulator. Technical Reference Guide / Ed. Kevin McGrattan. 2021. Vol. 1. DOI: 10.6028/NIST.SP.1018
20. McGrattan K., McDermott R., Floyd J. A simple two-step reaction scheme for soot and CO // Proceedings of the Tenth International Seminar on Fire and Explosion Hazards (ISFEH10). Oslo, NO. 2022.

REFERENCES

1. Batchner E., Parnell A. *Smoke hazards and smoke protection*. Moscow, Stroyizdat Publ., 1983; 153. (rus).
2. Klote J.H., Milke J.A. Principles of Smoke Management. *American Society of Heating, Refrigerating and Air-Conditioning Engineers & Society of Fire Protection Engineers*. Atlanta, 2002.
3. Esin V.M., Kalmykov S.P., Panov M.V., Tokarev V.N. *Fire safety in construction : textbook*. In two parts. Part 1. Moscow, Academy of State Fire Service of EMERCOM of Russia Publ., 2023; 333. (rus).
4. Puzach S.V., Komarevtsev N.V. Determination of the level of toxicity of combustion products of substances and materials during a fire from the point of view of blocking the escape route. *Roitman readings : collection of materials of the XI scientific and practical conference, Moscow, 21 March 2023*. Moscow, Academy of State Fire Service of EMERCOM of Russia Publ., 2023; 43–46 (rus).
5. Mustafin V.M., Puzach S.V. The influence of initial illumination and smoke-forming ability on the estimated time of blocking evacuation routes due to loss of visibility. *Life Safety*. 2020; 2(230):17–22. (rus).

6. Bagazhkov I.V., Konovalenko P.N., Naumov A.V. Smoke and its toxicity. *Current issues in natural science : proceedings of the V All-Russian scientific and practical conference with international participation, Ivanovo, March 24, 2020 of the year*. Ivanovo, Ivanovo Fire and Rescue Academy of the State Fire Service of the Ministry of Emergency Situations of Russia, 2020; 13-16. (rus).
7. Purser D.A. Toxic combustion product yields as a function of equivalence ratio and flame retardants in under-ventilated fires: Bench-large-scale comparisons. *Polymers*. 2016; 8(9):330. DOI: 10.3390/POLYM8090330
8. Su L.-C., Wu X., Zhang X., Huang X. Smart performance-based design for building fire safety: Prediction of smoke motion via AI. *Journal of Building Engineering*. 2021; 43(4):102529. DOI: 10.1016/j.jobbe.2021.102529
9. Khan M.M., Chaos M. Combustion characteristics of materials and generation of fire products. *SFPE Handbook of Fire Protection Engineering. 5th ed.* 2016; 1143-1232. DOI: 10.1007/978-1-4939-2565-0_36/FIGURES/27
10. Cheung W.T., Zeng Ya., Lin Sh., Huang X. Modelling carbon monoxide transport and hazard from smouldering for building fire safety design analysis. *Fire Safety Journal*. 2023; 140:103895. DOI: 10.1016/j.firesaf.2023.103895
11. Esin V.M., Kalmykov S.P. Justification of the smoke consumption removed from the floor corridors during a fire in high-rise buildings. *Fire Safety*. 2022; 3(108):76-85. DOI: 10.37657/vniipo.pb.2022.46.16.009 (rus).
12. Klotz J.H., Milke J.A., Turnbull P.G., Kashef A., Ferreira M.J. *Handbook of Smoke Control Engineering*. ASHRAE, 2012; 512.
13. Li L., Du F., Yang Y., Wei L., Huang F., Gao Z. et al. *Research on the smoke mass flow rate in one-dimensional spreading stage in tunnel with multiple fire sources*. 2022; 31:101801. DOI: 10.1016/j.csite.2022.101801
14. Veloo P., Quintiere J.G. Convective heat transfer coefficient in compartment fires. *Journal of Fire Sciences*. 2013; 31(5):410-423. DOI: 10.1177/0734904113479001
15. Mvogo P.O., Samedi O.Z., Chagement P., Zaida J.T., Nzie W., Fouda H.E. et al. Investigative study on convective heat transfer inside compartment during fire situation. *Journal of Combustion*. 2022; 2022:12. DOI: 10.1155/2022/6559812
16. Koshmarov Yu.A. *Modeling and analysis of human movements in various buildings : schoolbook*. Moscow, State Fire Academy of Emercom of Russia Publ., 2000; 119. (rus).
17. Drysdale D. *Introduction to the dynamics of fires*. Translated from the English by K.G. Bomstein; by Yu.A. Koshmarov, V.E. Makarov (Ed.). Moscow, Stroyizdat Publ., 1990; 424. (rus).
18. Barkalov B.V. Basis of design standards for emergency smoke ventilation. *Water supply and sanitary technology*. 1990; 9. (rus).
19. McGrattan K., Hostikka S., Floyd J., McDermott R., Vanella M. *NIST Special Publication 1018-1. 6th Edition. Fire Dynamics Simulator: Technical Reference Guide*. Kevin McGrattan (Ed.). 2021; 1. DOI: 10.6028/NIST.SP.1018
20. McGrattan K., McDermott R., Floyd J. A simple two-step reaction scheme for soot and CO. *Proceedings of the Tenth International Seminar on Fire and Explosion Hazards (ISFEH10)*. Oslo, NO. 2022.

Поступила 25.12.2023, после доработки 15.02.2024;

принята к публикации 29.02.2024

Received December 25, 2023; Received in revised form February 15, 2024;

Accepted February 29, 2024

Информация об авторах

ПУЗАЧ Сергей Викторович, д-р техн. наук, профессор, заслуженный деятель науки РФ, заведующий кафедрой 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; Scopus AuthorID: 7003537835; ResearcherID: U-2907-2019; ORCID: 0000-0001-7234-1339; e-mail: puzachsv@mail.ru

КАЛМЫКОВ Сергей Петрович, канд. техн. наук, доцент кафедры пожарной безопасности в строительстве, 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: 758175; ResearcherID: B-5446-2016; ORCID: 0000-0002-3444-086X; e-mail: k_sp@bk.ru

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

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Information about the authors

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

Sergey P. KALMYKOV, Cand. Sci. (Eng.), Associate Professor of Fire Safety in Construction Department, the State Fire Academy of the Ministry of Russian Federation for Civil Defense, Emergencies and Elimination on Consequences of Natural Disasters, Borisa Galushkina St., 4, Moscow, 129366, Russian Federation; ResearcherID: B-5446-2016; ID RISC: 758175; ORCID: 0000-0002-3444-086X; e-mail: k_sp@bk.ru

Contributions by authors: all authors made equivalent contributions to the preparation of the publication.

The authors declare that there is no conflict of interest.

Особенности поведения резервуаров с компримированным и сжиженным водородом в очаге пожара

Юрий Николаевич Шебеко ✉

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. Проведено обоснование важности исследований поведения резервуаров с компримированным и сжиженным водородом в очаге пожара в связи с тем, что такие аварии на объектах водородного транспорта являются наиболее опасными. Актуальность статьи обусловлена необходимостью оценки опасности указанного выше сценария аварии с целью его предотвращения и снижения последствий. Целью работы является анализ закономерностей протекания таких аварий на основе рассмотрения современных исследований в указанном направлении.

Поведение резервуаров с компримированным водородом в очаге пожара. Компримированный водород, как правило, хранится в баллонах из композитных материалов, а сжиженный — в двухоболочечных изотермических резервуарах. При попадании баллона из композитных материалов в очаг пожара через 5–15 мин происходит его взрыв. При этом давление газа в баллоне в момент его разрыва отличается от первоначального не более чем на 10 %.

Поведение резервуаров с жидким водородом в очаге пожара. Жидкий водород хранится и транспортируется в изотермических двухоболочечных резервуарах. Время сохранения целостности подобного резервуара (промежуток времени от начала огневого воздействия до разрыва) может достигать нескольких десятков минут в зависимости от его конструкции и интенсивности теплового воздействия.

Выводы. При разрушении баллонов с компримированным водородом и резервуаров с жидким водородом образуются ударные волны, огненные шары и разлетающиеся фрагменты баллонов и резервуаров. Размеры зон поражения могут достигать нескольких десятков метров в зависимости от параметров баллонов и резервуаров. При этом наибольший размер зоны поражения наблюдается в случае образования огненного шара.

Ключевые слова: разрыв резервуаров; время сохранения целостности; огненный шар; ударная волна; фрагменты резервуара

Для цитирования: Шебеко Ю.Н. Особенности поведения резервуаров с компримированным и сжиженным водородом в очаге пожара // Пожаровзрывобезопасность/Fire and Explosion Safety. 2024. Т. 33. № 2. С. 50–58. DOI: 10.22227/0869-7493.2024.33.02.50-58

✉ Шебеко Юрий Николаевич, e-mail: yn_shebeko@mail.ru

Behavior of compressed and liquefied hydrogen tanks in a fire zone

Yury N. Shebeko ✉

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

ABSTRACT

Introduction. The paper substantiates the importance of investigations into the behaviour of tanks with compressed and liquefied hydrogen in the body of the fire due to the fact that such accidents at hydrogen transport facilities are the most dangerous. The relevance of the paper is conditioned by the need to analyze such scenario of the accident to prevent it and to reduce its consequences. The aim of the paper is to analyze the regularities of such accidents on the basis of consideration of modern research in the specified direction.

Behavior of tanks with compressed hydrogen in the body of the fire. Compressed hydrogen is usually stored in composite cylinders, while liquefied hydrogen is stored in double-shell isothermal tanks. When the cylinder made of composite materials with compressed hydrogen gets into a fire, it explodes within 5–15 minutes if no fireproofing is made for these cylinders. A destruction of the cylinder made of the composite materials takes place at gas pressures exceeding an initial pressure not more than on 10 %. A rupture occurs due to a loss of polymer compound. A fire resistance limit of such a cylinder is inversely proportional to an intensity of thermal action of the fire.

Behavior of tanks with liquid hydrogen in a fire. Liquid hydrogen is stored and transported in double-shell isothermal tanks. The fire resistance limit of the liquefied hydrogen tank can reach several tens of minutes depending on the parameters of thermal isolation.

Conclusions. Shock waves, fireballs and fragments of the tanks are the main hazardous factors of the accidents with a rupture of the hydrogen tanks. Sizes of hazardous zones can reach several tens of metres, depending on the parameters of cylinders and tanks. The largest size of the affected zone was observed in the case of the fireball formation. The fire resistance limit of the tanks is inversely proportional to an intensity of the thermal action of the fire.

Keywords: tank rupture; fire resistance limit; fireball; shock wave; tank fragments

For citation: Shebeko Yu.N. Behavior of compressed and liquefied hydrogen tanks in a fire zone. *Pozharovzryvbezopasnost/Fire and Explosion Safety*. 2024; 33(2):50-58. DOI: 10.22227/0869-7493.2024.33.02.50-58 (rus).

✉ Yury Nikolaevich Shebeko, e-mail: yn_shebeko@mail.ru

Введение

В настоящее время в развитых странах мира большое внимание уделяется развитию водородной энергетики (преимущественно в части транспорта, работающего на водородном топливе). Так, согласно [1], в Корее эксплуатируются 16 206 автомобилей на водородном топливе, имеется 112 водородных АЗС (данные на август 2021 г.). Согласно планам, Корея до 2040 г. намеревается произвести 6,2 млн автомобилей на водородном топливе и построить 1200 водородных АЗС (включая многотопливные). Водородные технологии развиваются и в Российской Федерации. Обзор отечественных и международных документов в указанной области дан в работах [2, 3]. В [4–7] дан обзор отечественных и зарубежных работ, посвященных обеспечению пожарной безопасности объектов инфраструктуры транспорта, использующего водород как моторное топливо, а также объектов хранения и транспортировки водорода.

Одной из характерных пожароопасных аварий на объектах водородного транспорта является попадание топливного резервуара в очаг пожара. При этом возможен разрыв данного резервуара с образованием ударных волн, огненного шара с интенсивным тепловым излучением и разлетом фрагментов. В связи с этим представляет интерес аналитический обзор опубликованных в литературе трудов, посвященных рассмотрению указанных явлений. Такому обзору применительно к транспортным резервуарам посвящена настоящая статья.

Водород на борту автомобиля может храниться в резервуарах (баллонах) как в газообразном (компримированном) виде (GH_2), так и в виде жидкого продукта (LN_2). Поведение резервуаров с GH_2 и LN_2 в очаге пожара существенно различается, что и отражено в настоящей статье.

Поведение резервуаров с компримированным водородом в очаге пожара

В [1] экспериментально изучено воздействие очага пожара, расположенного под автомобилем на водородном топливе, на топливный бак (баллон) с GH_2 под давлением 70 МПа. Баллон имел оболочку из поли-

амида с внешним покрытием из углепластика, снабжен тепловым предохранительным клапаном (TPRD), рассчитанным на температуру 110 °С, и содержал 6,3 кг водорода. Очаг пламени создавался с помощью 24 горелок, работающих на гептане. Нагрев продолжался вплоть до взрыва баллона. Экспериментальный стенд был оборудован датчиками температуры, а также датчиками давления для регистрации ударной волны (УВ) при взрыве топливного бака. После зажигания горелок пламя быстро охватывало весь автомобиль. Баллон взорвался через 11 мин 12 с, образуя УВ, огненный шар в виде грибовидного облака и фрагменты топливного бака и автомобиля. Задняя часть автомобиля поднималась на высоту 1,5 м от земли и была отброшена на расстояние 2 м. Давление в УВ составляло 9–173 кПа в зависимости от расстояния от места взрыва (173 кПа на расстоянии 3 м). Фрагменты с массой до 23,2 кг (в основном 3–4 кг) разлетались на расстояния до 55,8 м (фрагменты баллона) и 38,7 м (фрагменты автомобиля).

Работа [8] посвящена экспериментальному изучению поведения водородного баллона из композитных материалов со встроенными полимерными нитями в очаге пожара. Отмечено, что в отличие от металлических баллонов разрушение сосуда из композитных материалов в очаге пожара происходит без существенного повышения давления газа. Были выполнены эксперименты с баллонами объемом 19 и 36 л, заполненными различными газами (азот, водород, гелий) при начальных давлениях 10,25, 52,5 и 70 МПа. В стенки сосудов были вмонтированы термопары на различных расстояниях по толщине стенки. Тепловой поток на стенки создавался четырьмя водородными инжекторами. Определяли время до разрыва баллона и температуру по толщине стенки.

Апробация методики эксперимента проведена на стальных баллонах, имеющих те же размеры, что и баллоны из композитных материалов. По оценкам авторов статьи, плотность теплового потока на стенки баллона составляет 80–100 кВт/м². Температура стальных стенок составляла 800–1000 °С. Проведено более 30 опытов с баллонами из композитных материалов. Найдено, что вид газовой среды внутри

баллонов не оказывает существенного влияния на их поведение в очаге пожара. Разрушение баллонов из композитных материалов происходит при давлениях, относительно слабо отличающихся от начального (71,5 МПа при начальном давлении 70 МПа). Это обусловлено деградацией материала стенок при воздействии пламени. Время до разрыва баллона составляло около 240 с, при этом температура стенок по толщине в момент разрыва варьируется от 95 (внутренняя поверхность стенки) до 400 °С (внешняя поверхность стенки). Изучено влияние начального давления на время, требуемое для разрушения баллона: 70 МПа — 240 с, 52,5 МПа — 311 с. При давлениях 10 и 25 МПа взрывного разрушения баллонов не происходило. Так, при времени 490 и 400 с произошла разгерметизация баллонов с плавным падением давления в них.

В работе [9] проведены эксперименты по изучению взрывов баллонов с газообразным водородом при воздействии очага пожара. Выполнены два крупномасштабных опыта по определению таких характеристик процесса при разрыве баллона, как давление в ударной волне, тепловое излучение образующегося огненного шара и разлет фрагментов баллонов. Баллоны были изготовлены из композитных материалов, армированных алюминиевыми нитями, имели длину 1775 мм, внешний диаметр 370 мм и объем 165 л. Начальное давление газа 35 МПа, максимально допустимое давление 43,75 МПа. Баллоны были оборудованы тепловыми предохранительными клапанами, но эти клапаны не сработали. Через 9 мин 36 с после начала огневого воздействия баллон взорвался, давление газа в нем в этот момент составило 44 МПа. Максимальный диаметр образовавшегося огненного шара составил 7–8 м при длительности существования шара 1,5 с. Максимальный фрагмент имел массу 79 кг. Максимальный радиус разлета фрагментов составил 200 м. Для расчетной оценки максимального диаметра огненного шара и его времени существования использованы ранее опубликованные в литературе формулы, полученные для углеводородных горючих. При этом оказалось, что указанные формулы достаточно хорошо описывают экспериментальные данные. Расчетным путем определили радиусы поражения ударной волной и дальность разлета фрагментов. Оценили безопасные расстояния с точки зрения указанных опасных факторов (для различных степеней поражения): для УВ — 14–65 м; для теплового излучения огненного шара — 52–140 м; для разлета фрагментов — 148–365 м.

В [10] теоретически изучено влияние скорости тепловыделения при пожаре (HRR) на предел огнестойкости баллона со сжатым водородом (здесь и далее под пределом огнестойкости понимается промежуток времени от начала огневого воздей-

ствия до разрыва баллона). Международные требования к водородным автомобилям сформулированы в нормативном документе¹. Согласно ему, пожарный тест (реакция на пожар) является обязательным для водородных топливных резервуаров. Топливный резервуар должен в обязательном порядке быть оборудован тепловым предохранительным клапаном (TPRD). В литературе описан ряд экспериментов, в которых найдено, что предел огнестойкости водородных топливных резервуаров (FRR) находится в диапазоне от 6 до 16 мин в зависимости от интенсивности теплового воздействия, характеризуемого величиной HRR. Для водородных автомобилей значения скорости тепловыделения находятся в пределах от 2 (легковые автомобили) до 150 (грузовые автомобили) МВт.

В [10] описаны результаты численного моделирования процесса воздействия пламени на резервуар с целью изучения влияния скорости тепловыделения HRR на предел огнестойкости резервуара FRR, которые сравнивались с имеющимися в литературе экспериментальными данными. Изученные баллоны не имели теплового предохранительного клапана. Баллоны подвергались воздействию газовых факелов смеси метан – воздух и пропана. Опыты выполнены с двумя баллонами объемом 36 и 72,4 л с начальным давлением 70 и 35 МПа соответственно. Методика проведения опытов отвечала требованиям нормативного документа¹, при этом скорости тепловыделения составляли 79, 165 и 370 кВт. Найдено, что предел огнестойкости FRR существенно зависит от скорости тепловыделения HRR. Так, для баллона объемом 36 л величина FRR составила 21 мин 36 с при огневом воздействии с HRR = 165 кВт. Численное моделирование для баллона объемом 72,4 л дает для предела огнестойкости величину 6 мин 46 с при скорости тепловыделения 370 кВт, т.е. имеет место выполаживание кривой зависимости $FRR = f(HRR)$. Численное моделирование показало, что при величине HRR более 350 кВт значение предела огнестойкости перестает зависеть от скорости тепловыделения.

В [11] экспериментально изучены взрывы автомобильных водородных баллонов при воздействии очага пожара. Изучены баллоны из композитных материалов, армированных как металлической нитью из алюминия (тип 3), так и нитью из полимерных материалов (тип 4). Баллоны не имели предохранительных клапанов и были рассчитаны на давление 35 МПа. Сосуд типа 3 объемом 88 л и длиной 0,84 м был установлен на автомобиле.

¹ GTR#13. United Nations Economic Commission for Europe. Global technical regulation on hydrogen and fuel cell vehicle. Addendum 13: Global technical regulation No.13. Global Registry. UNECE, 2013.

Мощность пропановой горелки, пламя которой воздействовало на баллон, составляла 265 кВт. Начальное давление водорода в сосуде 31,8 МПа. Сосуд типа 4 имел длину 0,84 м, диаметр 0,41 м и объем 72,4 л. На сосуд воздействовало пламя пропановых горелок с мощностью 370 кВт.

В экспериментах с сосудом типа 3 через 20 с после начала пламенного воздействия появился черный дым, свидетельствующий о деградации оболочки. Давление газа слабо изменялось в течение 1 мин 24 с, далее вышел из строя датчик давления. Через 12 мин 18 с произошел разрыв сосуда.

В экспериментах с сосудом типа 4 через 45 с огневого воздействия появился упомянутый выше черный дым. В течение 6 мин температура газа внутри сосуда выросла с 27 до 39 °С, а давление с 34,5 до 35,7 МПа. Еще через 27 с произошел разрыв сосуда.

При взрыве сосуда типа 3 давление в УВ составило 140 кПа на расстоянии 1,2 м и 12 кПа на расстоянии 15 м. При взрыве сосуда типа 4 давление в УВ составило 300 кПа на расстоянии 1,9 м и 40 кПа на расстоянии 6,5 м. Диаметр образующихся в результате разрыва сосудов огненных шаров составил 7,7–24 м, длительность горения 4,5 с. Максимальная плотность теплового потока на расстоянии 15,2 м составила 210 и 300 кВт/м². Максимальная масса фрагмента сосуда была равна 14 кг, этот фрагмент был найден на расстоянии 82 м от места проведения эксперимента.

В работе [12] получены номограммы для оценки поражающего действия УВ при взрыве водородного баллона в очаге пожара. Представлено два вида номограмм:

- 1) учитывающие воздействие УВ на человека;
- 2) учитывающие воздействие УВ на здания и сооружения.

Дается ссылка на работу [13], где показано, что риск эксплуатации водородных автомобилей в Лондоне приемлем, если предел огнестойкости топливного бака не менее 45 мин, что значительно больше, чем у имеющихся автомобильных топливных баков. Полученные в работе [12] номограммы позволяют определить уровень поражения человека и окружающих объектов в зависимости от рабочего давления в баллоне и расстояния от места взрыва.

В работе [14] описан инцидент со взрывом автомобильного баллона с компримированным природным газом (по сути, аналог инцидента со взрывом водородного баллона) в США в 2016 г., при котором были повреждены 4 дома.

Взрыв водородного баллона в очаге пожара приводит к возникновению УВ, огненного шара и разлету фрагментов. При этом следует различать взрывы в открытом пространстве и под днищем

автомобиля. Во втором случае автомобиль может быть сдвинут на десятки метров [14].

Взрывы баллонов с водородом в очаге пожара изучались, как правило, при реализации инцидента в открытом пространстве. Исключением является работа [15], в которой теоретически рассмотрен случай взрыва автомобильного водородного баллона в тоннеле. Тоннель имел ширину 5,5 м для одностороннего и 9 м для двустороннего движения. Высота тоннеля в обоих случаях составляла 4,5 м. Объемы баллонов составляли 10, 30, 60 и 120 л. Найдено, что типичное значение давления в УВ на расстоянии 5–10 м от места взрыва составляет 100 кПа. Рассчитаны значения зон поражения опасными факторами таких аварий (УВ, тепловое излучение огненного шара, разлет фрагментов баллонов), которые могут достигать сотен метров. При этом безопасное расстояние составляет более 3000 м, т.е. взрыв водородного баллона в очаге пожара в случае тоннеля значительно опаснее, чем в случае открытого пространства.

В работе [16] описаны результаты экспериментов по изучению поведения водородных баллонов из композитных материалов в очаге пожара. Отмечено, что эти баллоны при нагреве ведут себя совершенно иначе, чем металлические, которые быстро передают тепло к хранящемуся газу с соответствующим ростом давления. В случае баллонов из композитных материалов рост давления вплоть до их разрушения в очаге пожара не превышает 10 % от начального давления.

В первой серии опытов измеряли тепловой поток, падающий на стенку баллона, используя в качестве имитатора металлический сосуд объемом 36 л, оснащенный 24 термопарами, при воздействии водородно-кислородного пламени. Найдено, что разница температур в различных точках по толщине стенки не превышала 70 °С при температуре внутренней поверхности стенки 650 °С. Исследовали влияние вида газа внутри баллона на его предел огнестойкости (заменяли водород на гелий и азот). Найдено, что вид газа не оказывает существенного влияния на предел огнестойкости баллона.

Во второй серии проведены опыты с баллонами из композитных материалов объемом 36 л при начальном давлении 70 МПа. Баллоны взрывались через 240 с, при этом повышение давления составляло всего 1,5 МПа. Таким образом, разрушение баллона происходит не из-за высокого давления, а из-за потери стенкой баллона механической прочности при воздействии пламени. Выполнены также опыты при начальном давлении 10, 25 и 52,5 МПа. Если при начальных давлениях 52,5 и 70 МПа происходил разрыв баллона, то при начальных давлениях 10 и 25 МПа возникала утечка газа из-за плавления полимерной составляющей композитного материала с образованием местной негерметичности.

Рассмотрено воздействие пламени на контейнер, содержащий 4 баллона объемом 150 л каждый при начальном давлении газа 70 МПа. Найдено, что при огневом воздействии баллоны не взрываются одновременно и безопасные расстояния можно определять как для одного баллона. С точки зрения допустимого давления в УВ при разрыве баллона 5 кПа безопасное расстояние составляет 34 м. Рекомендуется размещать баллоны в металлических ящиках, при этом баллон при начальном давлении 70 МПа выдерживает 13 мин огневого воздействия.

Возникает вопрос, как снизить опасность взрыва водородного баллона в очаге пожара. Одним из возможных способов является использование тепловых предохранительных клапанов. В работе [17] рассмотрено поведение емкостей для хранения водорода, оборудованных TPRD. Отмечено, что для хранения GH_2 наибольшее распространение получили баллоны из композитных материалов с алюминиевыми и полимерными нитями внутри стенок. Эти баллоны должны вмещать до 5 кг (легковые автомобили), 50 кг (грузовые автомобили), 100–200 кг (железнодорожные локомотивы) и быть рассчитаны на давление 35 или 70 МПа. Основное достоинство баллона из композитных материалов — низкий вес, основной недостаток — низкая огнестойкость. Для компенсации этого недостатка предложено использовать тепловые предохранительные клапаны в соответствии с нормативными документами^{1, 2}. Однако в этих документах не прописаны детальные требования к TPRD. Решению этой задачи посвящена работа [17]. Экспертная оценка дает для требуемой величины диаметра TPRD значение 5–6 мм, но эта величина не имеет под собой экспериментального обоснования. Длина водородного факела при диаметре 6 мм и давлении 87,5 МПа составляет 21 м. Это означает, что срабатывание TPRD в закрытых объемах (тоннели, автомобильные парковки, склады) может привести к созданию обширных зон загазованности. Цель работы [17] — найти нижнюю границу диаметра TPRD, при которой, с одной стороны, предотвращается разрыв баллона в очаге пожара и, с другой, исключается факел большого размера и недопустимо высокое давление для строительных конструкций при сгорании газа в струевом пламени.

Разработана математическая модель поведения баллона, оснащенного тепловым предохранительным клапаном, в очаге пожара. Модель верифицирована с помощью экспериментальных данных, полученных в Германии в институте Karlsruhe Institute of Technology на емкостях с гелием объемом 19 и 26 л

при начальном давлении 70 МПа. Найдено, что предел огнестойкости баллона FRR обратно пропорционален удельной скорости тепловыделения при пожаре пролива горючей жидкости HRR/A (A — площадь пожара). Для величины HRR/A 1–2 МВт/м², характерной для горения бензина или дизельного топлива, величина FRR составляет 4–6 мин.

Другой возможностью предотвращения взрыва баллона с водородом в очаге пожара является использование вспучивающихся огнезащитных покрытий вместе с тепловыми предохранительными клапанами. В работе [18] проведено математическое моделирование поведения водородного баллона из композитных материалов, снабженного TPRD и вспучивающимся огнезащитным покрытием, в очаге пожара. Найдено, что при диаметре TPRD 1 мм и толщине огнезащитного покрытия 10,0, 13,5 и 16,5 мм предел огнестойкости составляет 49, 70 и 91 мин.

Поведение резервуаров с жидким водородом в очаге пожара

Значительно меньшее количество исследований посвящено изучению поведения резервуаров с жидким водородом LH_2 в очаге пожара. Анализ возможности разрыва резервуара с LH_2 в очаге пожара выполнен в работе [19]. Отмечено, что жидкий водород хранят в двухболоочечных резервуарах с разными видами вакуумной теплоизоляции. При этом существенна глубина вакуума: при давлении 10^{-4} торр коэффициент теплопроводности газовой среды составляет 0,04 Вт/(м·К), а при давлении 100 торр — $30 \cdot 10^{-4}$ Вт/(м·К). Одним из наиболее опасных сценариев развития аварии при воздействии на резервуар с LH_2 очага пожара является реализация эффекта BLEVE (взрыв паров вскипающей жидкости), который был экспериментально исследован компанией BMW в 1992–1995 гг. [20].

В работе [19] описан подход к оценке последствий аварий с возникновением BLEVE на резервуарах с жидким водородом. Описан механизм реализации BLEVE в перегретых жидкостях. Отмечены три основных опасных фактора таких аварий: УВ, тепловое излучение огненного шара и разлетающиеся фрагменты резервуара. Приведены аналитические соотношения для оценки величин упомянутых факторов. В частности, для длительности и интенсивности теплового излучения огненного шара использованы формулы, применявшиеся ранее для резервуаров с углеводородами. Для среднеповерхностной плотности теплового излучения при массе жидкого водорода в резервуаре более 1000 кг принята величина 350 кВт/м², сравнимая со случаем пропана [21] и меньшая, чем для природного газа (450 кВт/м² [22]). Проведены расчеты размеров зон поражения при возникновении BLEVE на резервуарах с LH_2 . При этом

² United Nations Economic Commission for Europe. Addendum 133 – Regulation No.134. Uniform provisions concerning the approval of motor vehicles and their components with regards to the safety-related performance of hydrogen fueled vehicles (HFCV).

наибольший размер зоны поражения оказался для теплового излучения огненного шара.

В работе [23] выполнены эксперименты по изучению воздействия пожара на резервуары с жидким водородом объемом 1 м³. Резервуары были двухоболочечными с заполнением жидким водородом на 35–40 % по объему (масса LН₂ 25–30 кг). Эксперименты выполнены на полигоне ВАМ на площадке диаметром 400 м с обетонированием в центре на площади 80 × 80 м. Испытали два горизонтальных резервуара, один из которых был с вакуумно-перлитовой теплоизоляцией, а другой — с многослойной теплоизоляцией, а также один вертикальный резервуар с вакуумно-перлитовой теплоизоляцией. Обе оболочки каждого резервуара были изготовлены из нержавеющей стали, внешняя имела толщину 3 мм из нержавеющей стали, а внутренняя — 4 мм (в верхней части 5 мм). Оболочки рассчитаны на давление 0,9 МПа. Давление воздуха в межоболочечном пространстве составляло 3 мбар. Термодатчики, прокладки фланцев, трубопроводы и арматура были защищены от воздействия пламени стекловатой.

Огневое воздействие на резервуар осуществляли с помощью 36 пропановых горелок, что обеспечивало плотность теплового потока на стенки 100–150 кВт/м². Пропан подавался из резервуара, отгороженного бетонной стеной от места расположения испытываемого резервуара. Расположение горелок обеспечивало равномерный обогрев стенок резервуара. Термодатчики располагались во внутренней оболочке в газовой и жидкой фазах, а также на поверхности внутренней и внешней оболочки в межоболочечном пространстве. Во внутренней оболочке и в межоболочечном пространстве располагались датчики давления. На экспериментальной площадке имелись датчики теплового потока для регистрации излучения от возможного огненного шара и датчики давления для регистрации УВ в двух направлениях для случая взрыва резервуара.

Горизонтальный резервуар с вакуумно-перлитовой теплоизоляцией не претерпел разрушения при длительности огненного воздействия 80 мин. Через 50 мин после начала огненного воздействия произошла разгерметизация наружной оболочки, через 75 мин разгерметизировался один из клапанов с образованием водородного факела. При этом давление во внутренней оболочке за 300 с упало с 2,35 до 1,0 МПа и до 0,1 МПа за 1000 с (момент окончания опыта).

При огневом воздействии на горизонтальный резервуар с многослойной теплоизоляцией сброс продукта через предохранительный клапан начался через 40 мин после начала воздействия. Образование факела не наблюдалось из-за сброса водорода по специальному трубопроводу на значительном расстоянии от пламени. После начала сброса продукта

давление в резервуаре стабилизировалось на уровне 5 МПа. Через 68 мин после начала огненного воздействия резервуар взорвался с образованием огненного шара, УВ и разлетом фрагментов. В момент взрыва температуры жидкой и паровой фаз продукта составили –245 и –180 °С соответственно (перед началом эксперимента эти величины составляли –253 и –250 °С соответственно). При этом в момент взрыва резервуара температура жидкой фазы была близка к предельной температуре перегрева. Давление в межоболочечном пространстве в этот момент составило 56 мбар (до начала огненного воздействия 0,3 мбар). Образовавшиеся при взрыве резервуара фрагменты разлетались на расстояние до 200 м, относительно крупные фрагменты — на расстоянии от 6 до 35 м. Давление в УВ на расстояниях 22,5 и 26,4 м составило 1,33 и 0,99 кПа. Максимальный диаметр огненного шара составил 20 м при длительности около 5 сек с временем подъема шара 2 с. Плотность теплового потока от огненного шара была равна 2,1 и 1,2 кВт/м² на расстояниях 70 и 90 м.

Огневое воздействие на вертикальный резервуар с вакуумно-перлитовой теплоизоляцией продолжалось в течение 4 ч и было прекращено из-за израсходования пропана. В этот момент давление в резервуаре составляло 6 МПа. При этом внешняя оболочка резервуара была разгерметизирована через короткое время после начала опыта.

В работе [24] путем численного моделирования изучены параметры УВ при разрушении резервуара с жидким водородом в очаге пожара. Описан инцидент с резервуаром для хранения LН₂ объемом 76 м³. В описанном инциденте произошло истечение продукта через сбросную свечу с образованием факела. Прибывшие к месту пожара пожарные попытались потушить факел путем подачи воды. За счет замерзания воды в отверстии сбросной трубы подача газа и горение прекратились, при этом перестал работать замерзший предохранительный клапан. В результате реализовался взрыв резервуара в режиме BLEVE. Со ссылкой на работу [20] описаны эксперименты компании BMW по изучению опасных факторов (УВ, тепловое излучение) при взрыве резервуаров с жидким водородом в очаге пожара. Объем резервуаров составлял 120 л. Давление газа в резервуаре непосредственно перед разрушением составляло от 0,2 до 1,5 МПа. Разрыв резервуара инициировали подрывом навески конденсированного взрывчатого вещества (ВВ). Получена трехпиковая структура волны давления при взрыве резервуара, которая в работе [24] объясняется следующим образом.

Первый пик вызван взрывом ВВ. Второй пик обусловлен выходом водорода в атмосферу и сгоранием образующейся водородовоздушной смеси в взрывном режиме. Третий пик вызван реализацией

эффекта BLEVE, т.е. взрывным вскипанием жидкого водорода при падении давления. Неожиданным оказался тот факт, что второй пик давления превышает третий в отличие от случая, когда в резервуаре хранятся углеводороды. Это обусловлено значительно более высокой скоростью сгорания водородовоздушных смесей по сравнению со случаем смесей углеводородных газов с воздухом.

Выводы

На основании проведенного анализа литературных данных могут быть сделаны следующие выводы.

1. Водород может храниться как в сжатом, так и в жидком виде. Сжатый водород, как правило, хранится в баллонах из композитных материалов, а сжиженный водород — в двухоболочечных изотермических резервуарах. В зависимости от этого поведение резервуаров с водородом в очаге пожара существенно различается.

2. При попадании в очаг пожара баллон из композитных материалов взрывается, как правило, через 5–15 мин после начала огневого воздействия. Исключения могут составлять огнезащищенные и имеющие тепловой предохранительный клапан достаточно большого проходного сечения (диаметр не менее 5–6 мм). Наличие огнезащитного покрытия

может увеличить время пребывания баллона в очаге пожара без взрыва до нескольких десятков минут.

3. Разрушение баллона из композитных материалов с сжатым водородом в очаге пожара происходит при давлениях газа, слабо отличающихся от рабочего давления (отличие, как правило, не более 10 %). Это обусловлено тем обстоятельством, что основной причиной разрушения баллона является не чрезмерное повышение давления газа в нем, а потеря полимерного связующего из его стенок. При этом предел огнестойкости баллона (время, в течение которого он сохраняет свою целостность) обратно пропорционально интенсивности теплового воздействия.

4. Предел огнестойкости двухоболочечного резервуара с жидким водородом может достигать нескольких десятков минут в зависимости от его конструкции (включая параметры тепловой изоляции) и интенсивности теплового воздействия.

5. При разрушении баллонов с сжатым водородом и резервуаров с жидким водородом образуются ударные волны, огненные шары и разлетающиеся фрагменты баллонов и резервуаров. Размеры зон поражения могут достигать нескольких десятков метров в зависимости от параметров баллонов и резервуаров. При этом наибольший размер зоны поражения наблюдается в случае образования огненного шара.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Byoungjik Park, Yangkyun Kim. Reenacting the hydrogen tank explosion of a fuel-cell electric vehicle: An experimental study // *International Journal of Hydrogen Energy*. 2023. Vol. 48. Pp. 34987–35003.
2. Гордиенко Д.М., Шебеко Ю.Н. Пожаровзрывобезопасность объектов водородной энергетики // *Безопасность труда в промышленности*. 2022. № 2. С. 7–12. DOI: 10.24000/0409-2961-2022-2-7-12
3. Шебеко Ю.Н. Нормативные документы, регламентирующие вопросы пожарной безопасности объектов инфраструктуры водородной энергетики // *Пожарная безопасность*. 2020. № 4. С. 36–42.
4. Гордиенко Д.М., Шебеко Ю.Н. Пожарная безопасность объектов инфраструктуры транспорта на водородном топливе // *Пожаровзрывобезопасность/Fire and Explosion Safety*. 2022. Т. 31. № 2. С. 41–51. DOI: 10.22227/0869-7493.2022.31.02.41-51
5. Шебеко Ю.Н. Пожарная безопасность водородных автозаправочных станций // *Пожаровзрывобезопасность/Fire and Explosion Safety*. 2020. Т. 29. № 4. С. 42–50. DOI: 10.22227/PVB.2020.29.04.42-50
6. Шебеко Ю.Н., Болодьян И.А. Международный опыт обеспечения пожарной безопасности водородных автозаправочных станций // *Вести газовой науки. Научно-технический сборник*. 2022. № 2 (51). С. 151–157.
7. Шебеко Ю.Н. Пожарная безопасность хранения и транспортировки водорода // *Пожарная безопасность*. 2023. № 1. С. 17–26. DOI: 10.37657/vniipo.pb.2023.110.1.001
8. Halm D., Fouillen F., Lain E., Gueguen M., Bertheau D., Eckelen T. Composite pressure vessels for hydrogen storage in fire conditions: Fire tests and simulation // *International Journal of Hydrogen Energy*. 2017. Vol. 42. Pp. 20056–20076. DOI: 10.1016/j.ijhydene.2017.06.088
9. Chuanchuan Shen, Li Ma, Gai Huang, Yingzhe Wu, Jinyang Zheng, Yan Liu et al. Consequence assessment of high-pressure hydrogen storage tank rupture during fire test // *Journal of Loss Prevention in the Process Industries*. 2018. Vol. 55. Pp. 223–231. DOI: 10.1016/j.jlp.2018.06.016
10. Kashkarov S., Makarov D., Molkov V. Effect of a heat release rate on reproducibility of the test for hydrogen storage cylinder // *International Journal of Hydrogen Energy*. 2018. Vol. 43. No. 21. Pp. 10185–10192. DOI: 10.1016/j.ijhydene.2018.04.047
11. Zalosh R. Blast waves and fireballs generated by hydrogen fuel tank rupture during fire exposure // *Proceedings of the 5th International Seminar on Fire and Explosion Hazards*. Edinburgh, 2008. Pp. 149–158.

12. Kashkarov S., Li Z., Molkov V. Blast wave from a hydrogen tank rupture in the open: Hazard distances nomograms // *International Journal of Hydrogen Energy*. 2020. Vol. 45. Pp. 2429–2446. DOI: 10.1016/j.ijhydene.2019.11.084
13. Dadashzadeh M., Kashkarov S., Makarov D., Molkov V. Risk assessment methodology for onboard hydrogen storage // *International Journal of Hydrogen Energy*. 2018. Vol. 43. Pp. 6462–6475. DOI: 10.1016/j.ijhydene.2018.01.195
14. Molkov V., Kashkarov S. Blast wave from a high pressure gas tank rupture in a fire: stand-alone and under vehicle hydrogen tanks // *International Journal of Hydrogen Energy*. 2015. Vol. 40. No. 36. Pp. 12581–12603. DOI: 10.1016/j.ijhydene.2015.07.001
15. Molkov V., Dery W. The blast wave decay correlation for hydrogen tank rupture in a tunnel fire // *International Journal of Hydrogen Energy*. 2020. Vol. 45. Pp. 31289–31302. DOI: 10.1016/j.ijhydene.2020.08.062
16. Blanc-Vannet P., Jallais S., Fuster B., Fouillen F., Halm D. Fire tests carried out in FGH JU Firecomp project, recommendations and application to safety of gas storage systems // *International Journal of Hydrogen Energy*. 2019. Vol. 44. Pp. 9100–9109.
17. Molkov V., Dadashzadeh M., Kashkarov S., Makarov D. Performance of hydrogen storage tank with TPRD in an engulfing fire // *International Journal of Hydrogen Energy*. 2021. Vol. 46. Pp. 36581–36587. DOI: 10.1016/j.ijhydene.2021.08.128
18. Kim Y., Makarov D., Kashkarov S., Joseph P., Molkov V. Modeling heat transfer in an intumescent paint and its effect on fire resistance of on-board hydrogen storage // *International Journal of Hydrogen Energy*. 2017. Vol. 42. No. 11. Pp. 7297–7303.
19. Ustolin F., Paltrinieri N., Landucci G. An innovative and comprehensive approach for the consequence analysis of liquid hydrogen vessel explosions // *Journal of Loss Prevention in the Process Industries*. 2020. Vol. 68. P. 104323. DOI: 10.1016/j.jlp.2020.104323
20. Pehr K. Aspects of safety and acceptance of LH₂ tank systems in passengers cars // *International Journal of Hydrogen Energy*. 1996. Vol. 21. Pp. 387–395.
21. Roberts A.F. Thermal radiation hazards from released LPG from pressurized storage // *Fire Safety Journal*. 1982. Vol. 4. Pp. 197–212. DOI: 10.1016/0379-7112(81)90018-7
22. Betteridge S., Phillips L. Large scale pressurized LNG BLEVE experiments. Symposium series no. 160. Hazards 25. Shell. 2015. 12 p.
23. Wingerden K., Kluge M., Habib A.K., Ustolin F., Paltrinieri N. Medium-scale tests to investigate the possibility and effects of BLEVEs of storage vessels containing liquefied hydrogen // *Chemical Engineering Transactions*. 2022. Vol. 90. Pp. 547–552. DOI: 10.3303/CET2290092
24. Cirrone D., Makarov D., Molkov V. Rethinking “BLEVE explosion” after liquid hydrogen storage tank rupture in a fire // *International Journal of Hydrogen Energy*. 2023. Vol. 48. Pp. 8716–8730. DOI: 10.1016/j.ijhydene.2022.09.114

REFERENCES

1. Byoungjik Park, Yangkyun Kim. Reenacting the hydrogen tank explosion of a fuel-cell electric vehicle: An experimental study. *International Journal of Hydrogen Energy*. 2023; 48:34987-35003.
2. Gordienko D.M., Shebeko Yu.N. Fire and explosion safety of objects of hydrogen energetics. *Occupational Safety in Industry*. 2022; 2:7-12. DOI: 10.24000/0409-2961-2022-2-7-12 (rus).
3. Shebeko Yu.N. Normative documents on fire safety of hydrogen energetics infrastructure. *Fire Safety*. 2020; 4:36-42 (rus).
4. Gordienko D.M., Shebeko Yu.N. Fire safety of objects of hydrogen transport infrastructure. *Pozharovzrивbezopasnost/Fire and Explosion Safety*. 2022; 31(2):41-51. DOI: 10.22227/0869-7493.2022.31.02.41-51 (rus).
5. Shebeko Yu.N. Fire safety of hydrogen refueling stations. *Pozharovzrивbezopasnost/Fire and Explosion Safety*. 2020; 29(4):42-50. DOI: 10.22227/PVB.2020.29.04.42-50 (rus).
6. Shebeko Yu.N., Bolodian I.A. An international experience of fire safety provision of hydrogen refueling stations. *News of gas science. Scientific and Technical Book*. 2022; 2(51):151-157. (rus).
7. Shebeko Yu.N. Fire safety of storage and transportation of hydrogen. *Fire Safety*. 2023; 1:17-26. DOI: 10.37657/vniipo.pb.2023.110.1.001 (rus).
8. Halm D., Fouillen F., Lain E., Gueguen M., Bertheau D., Eckelen T. Composite pressure vessels for hydrogen storage in fire conditions: Fire tests and simulation. *International Journal of Hydrogen Energy*. 2017; 42:20056-20076. DOI: 10.1016/j.ijhydene.2017.06.088
9. Chuanchuan Shen, Li Ma, Gai Huang, Yingzhe Wu, Jinyang Zheng, Yan Liu et al. Consequence assessment of high-pressure hydrogen storage tank rupture during fire test. *Journal of Loss Prevention in the Process Industries*. 2018; 55:223-231. DOI: 10.1016/j.jlp.2018.06.016

10. Kashkarov S., Makarov D., Molkov V. Effect of a heat release rate on reproducibility of the test for hydrogen storage cylinder. *International Journal of Hydrogen Energy*. 2018; 43(21):10185-10192. DOI: 10.1016/j.ijhydene.2018.04.047
11. Zalosh R. Blast waves and fireballs generated by hydrogen fuel tank rupture during fire exposure. *Proceedings of the 5th International Seminar on Fire and Explosion Hazards*. Edinburgh, 2008; 149-158.
12. Kashkarov S., Li Z., Molkov V. Blast wave from a hydrogen tank rupture in the open: Hazard distances nomograms. *International Journal of Hydrogen Energy*. 2020; 45:2429-2446. DOI: 10.1016/j.ijhydene.2019.11.084
13. Dadashzadeh M., Kashkarov S., Makarov D., Molkov V. Risk assessment methodology for onboard hydrogen storage. *International Journal of Hydrogen Energy*. 2018; 43:6462-6475. DOI: 10.1016/j.ijhydene.2018.01.195
14. Molkov V., Kashkarov S. Blast wave from a high pressure gas tank rupture in a fire: stand-alone and under vehicle hydrogen tanks. *International Journal of Hydrogen Energy*. 2015; 40(36):12581-12603. DOI: 10.1016/j.ijhydene.2015.07.001
15. Molkov V., Dery W. The blast wave decay correlation for hydrogen tank rupture in a tunnel fire. *International Journal of Hydrogen Energy*. 2020; 45:31289-31302. DOI: 10.1016/j.ijhydene.2020.08.062
16. Blanc-Vannet P., Jallais S., Fuster B., Fouillen F., Halm D. Fire tests carried out in FGH JU Firecomp project, recommendations and application to safety of gas storage systems. *International Journal of Hydrogen Energy*. 2019; 44:9100-9109.
17. Molkov V., Dadashzadeh M., Kashkarov S., Makarov D. Performance of hydrogen storage tank with TPRD in an engulfing fire. *International Journal of Hydrogen Energy*. 2021; 46:36581-36587. DOI: 10.1016/j.ijhydene.2021.08.128
18. Kim Y., Makarov D., Kashkarov S., Joseph P., Molkov V. Modeling heat transfer in an intumescent paint and its effect on fire resistance of on-board hydrogen storage. *International Journal of Hydrogen Energy*. 2017; 42(11):7297-7303.
19. Ustolin F., Paltrinieri N., Landucci G. An innovative and comprehensive approach for the consequence analysis of liquid hydrogen vessel explosions. *Journal of Loss Prevention in the Process Industries*. 2020; 68:104323. DOI: 10.1016/j.jlp.2020.104323
20. Pehr K. Aspects of safety and acceptance of LH₂ tank systems in passengers cars. *International Journal of Hydrogen Energy*. 1996; 21:387-395.
21. Roberts A.F. Thermal radiation hazards from released LPG from pressurized storage. *Fire Safety Journal*. 1982; 4:197-212. DOI: 10.1016/0379-7112(81)90018-7
22. Betteridge S., Phillips L. Large scale pressurized LNG BLEVE experiments. *Symposium series no. 160. Hazards 25. Shell*. 2015; 12.
23. Wingerden K., Kluge M., Habib A.K., Ustolin F., Paltrinieri N. Medium-scale tests to investigate the possibility and effects of BLEVEs of storage vessels containing liquefied hydrogen. *Chemical Engineering Transactions*. 2022; 90:547-552. DOI: 10.3303/CET2290092
24. Cirrone D., Makarov D., Molkov V. Rethinking “BLEVE explosion” after liquid hydrogen storage tank rupture in a fire. *International Journal of Hydrogen Energy*. 2023; 48:8716-8730. DOI: 10.1016/j.ijhydene.2022.09.114

Поступила 10.01.2024, после доработки 19.02.2024;
принята к публикации 04.03.2024

Received January 10, 2024; Received in revised form February 19, 2024;
Accepted March 4, 2024

Информация об авторе

Шебеко Юрий Николаевич, д-р техн. наук, профессор, 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; РИНЦ ID: 47042; Scopus AuthorID: 7006511704; ORCID: 0000-0003-1916-2547; e-mail: yn_shebeko@mail.ru

Information about the authors

Yury N. SHEBEKO, Dr. Sci. (Eng.), Professor, 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; ID RISC: 47042; Scopus AuthorID: 7006511704; ORCID: 0000-0003-1916-2547, e-mail: yn_shebeko@mail.ru

ПОЖАРОВЗРЫВБЕЗОПАСНОСТЬ/FIRE AND EXPLOSION SAFETY. 2024. Т. 33. № 2. С. 59–67
POZHAROVZRYVOBEZOPASNOST/FIRE AND EXPLOSION SAFETY. 2024; 33(2):59-67

НАУЧНАЯ СТАТЬЯ/RESEARCH PAPER

УДК 614.844, 519.217.2

<https://doi.org/10.22227/0869-7493.2024.33.02.59-67>

Моделирование процесса эксплуатации систем противопожарной защиты с использованием марковских цепей

Леонид Тимофеевич Танклевский¹, Александр Алексеевич Таранцев²✉, Иван Дмитриевич Балабанов¹

¹ Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого, г. Санкт-Петербург, Россия

² Институт проблем транспорта им. Н.С. Соломенко Российской академии наук, г. Санкт-Петербург, Россия

АННОТАЦИЯ

Введение. В данной статье рассмотрены теоретические и практические аспекты применения цепей Маркова к моделированию функционирования систем противопожарной защиты объектов на примере автоматических установок пожаротушения.

Материалы и методы. В процессе работы использован математический аппарат цепей Маркова и приведены соответствующие теоретические сведения. В качестве примера принята автоматическая установка пожаротушения и приведен граф ее состояний, с помощью которого становится возможным теоретически описать и количественно оценить вероятности состояний установки. Показана возможность оптимизации такого графа.

Теоретические основы. Определение вероятностей состояний исследуемой системы (в данном случае — автоматической установки пожаротушения) в процессе эксплуатации — режим готовности, временного отключения, срабатывания, восстановления готовности и тестирования, что позволяет как оценить эффективность ее применения, так и выработать необходимые рекомендации по повышению эффективности.

Результаты и их обсуждение. В результате исследования были получены математические выражения и количественные оценки вероятностей состояний автоматической установки пожаротушения, на основе которых могут быть сформулированы предложения по повышению эффективности ее функционирования. С использованием оптимизированного графа марковской цепи получено аналитическое выражение для оценки динамики вероятности состояния готовности к применению автоматической установки пожаротушения.

Выводы. На примере процесса эксплуатации автоматической установки пожаротушения показана возможность его описания с помощью полумарковской цепи с целью оценки вероятностей состояний установки. Также показана возможность оптимизации цепи с целью ее упрощения и получения аналитических выражений динамики вероятностей состояний. Представленный подход может быть использован другими исследователями для решения аналогичных задач.

Ключевые слова: автоматические установки пожаротушения; вероятности состояний; моделирование; безопасность; граф состояний

Для цитирования: Танклевский Л.Т., Таранцев А.А., Балабанов И.Д. Моделирование процесса эксплуатации систем противопожарной защиты с использованием марковских цепей // Пожаровзрывобезопасность/Fire and Explosion Safety. 2024. Т. 33. № 2. С. 59–67. DOI: 10.22227/0869-7493.2024.33.02.59-67

✉ Таранцев Александр Алексеевич, e-mail: t_54@mail.ru

Modelling the operation process of fire protection systems using Markov chains

Leonid T. Tanklevskiy¹, Alexander A. Tarantsev²✉, Ivan D. Balabanov¹

¹ Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University, Saint Petersburg, Russian Federation

² Solomenko Institute of Transport Problems of the Russian Academy of Sciences, Saint Petersburg, Russian Federation

ABSTRACT

Introduction. In this paper, theoretical and practical aspects of application of Markov chains to modelling of functioning of systems of fire protection of objects on the example of automatic fire extinguishing systems are considered.

Materials and methods. In the process of work, the mathematical apparatus of Markov chains was used and relevant theoretical information was provided. An automatic fire extinguishing system is used as an example and a graph of its states is given, with the help of which it becomes possible to describe theoretically and quantitatively estimate the probabilities of the installation states. The possibility of optimization of such a graph is shown.

Theoretical basis. Determination of probabilities of the conditions of the system under study (in this case, an automatic fire extinguishing system) during operation — readiness mode, temporary shutdown, operation, restoration of readiness and testing, which allows both to assess the effectiveness of its application and to develop the necessary recommendations to improving efficiency.

The results and their discussion. As a result of the study, mathematical expressions and quantitative estimates of the probabilities of the states of an automatic fire extinguishing system were obtained, on the basis of which proposals can be formulated to improve the efficiency of its functioning. Using the optimized Markov chain graph, an analytical expression for estimating the dynamics of the state probability of readiness to use of an automatic fire extinguishing system was obtained.

Conclusions. Using the example of the operation process of an automatic fire extinguishing system, the paper shows the possibility of describing it using a semi-Markov chain in order to assess the probabilities of installation conditions. The possibility of optimizing the chain in order to simplify it and obtain analytical expressions of the dynamics of the probabilities of states is also shown. The presented approach can be used by other researchers to solve similar problems.

Keywords: automatic fire extinguishing installations; state probabilities; modelling; safety; graph of states

For citation: Tanklevskiy L.T., Tarantsev A.A., Balabanov I.D. Modelling the operation process of fire protection systems using Markov chains. *Pozharovzryvbezopasnost/Fire and Explosion Safety*. 2024; 33(2):59-67. DOI: 10.22227/0869-7493.2024.33.02.59-67 (rus).

✉ Alexander Alekseevich Tarantsev, e-mail: t_54@mail.ru

Введение

Защита людей и материальных ценностей от опасных факторов пожара (ОФП) является одной из важнейших задач нашего государства¹. Для этого систе-

мами противопожарной защиты (СППЗ)² должны быть оснащены различные объекты, в том числе объекты транспортной инфраструктуры: гаражи и автостоянки закрытого типа, заправочные станции, станции техоб-



a



b



c



d

Рис. 1. Модульные АУП: а — тушения тонкораспыленной водой; б — газового; с — пенного; d — порошкового тушения (фото из открытого доступа в сети Интернет)

Fig. 1. Modular automatic fire extinguishing systems: a — fine spray water extinguishing; b — gas; c — foam; d — powder extinguishing (Photos from open access on the Internet)

¹ О пожарной безопасности : Федеральный закон от 21.12.1994 № 69-ФЗ (последняя редакция).

² Технический регламент о требованиях пожарной безопасности : Федеральный закон от 22 июля 2008 года № 123-ФЗ (с изменениями).

служивания и ремонта транспортных средств и т.п. Важное место среди СППЗ занимают автоматические установки пожаротушения (АУП)³ [1, 2], позволяющие оперативно подать огнетушащие вещества (ОТВ) в очаг пожара (рис. 1) [3, 4].

Срабатывание АУП при пожаре позволяет также выдать соответствующий сигнал в пожарную часть, в районе выезда которой находится защищаемый объект, а также активировать на нем систему оповещения и управления эвакуацией (СОУЭ) [5], являющейся важной составляющей общей СППЗ объекта, для обеспечения безопасности находящихся там людей^{4, 5}. Это в полной мере относится и к системе дымоудаления⁶ [6], а также к дежурно-диспетчерским службам⁷ [7].

В этой связи представляется целесообразным провести моделирование процесса эксплуатации СППЗ (готовность к применению, срабатывание, восстановление готовности, проверки, хранение и т.п.). Такое моделирование позволит оценить эффективность и надежность работы системы и выявить возможные узкие места или риски при ее эксплуатации. Такой подход также позволит оптимизировать процессы в области готовности к применению, срабатывания, восстановления готовности, проверок и хранения. Кроме того, моделирование с использованием цепей Маркова [8–10] позволит провести анализ вероятности срабатывания системы в различных условиях эксплуатации и оценить ее надежность [11–13]. Таким образом, данное исследование будет полезным для оптимизации процессов эксплуатации СППЗ и повышения уровня безопасности и надежности системы с учетом имеющихся разработок в этой области [14, 15].

Теория и расчеты

Краткая историческая справка: в 1906 г. выдающийся русский математик Андрей Андреевич Марков (1856–1922) предложил подход [16] к исследованию систем и процессов, сущность которого

в следующем. Пусть исследуемая система может пребывать в конечном числе n состояний $\{S\}$, а переход из одного состояния в другое обуславливается только вероятностью этого состояния и вероятностями перехода в другие состояния, но не зависит от предыстории, т.е. от предыдущего состояния. При этом граф переходов будет выглядеть как n -мерная цепочка состояний $\{S\}$ (отсюда и термин «цепь Маркова»), а соответствующая ему матрица вероятностей переходов $\{p_{ij}\}$ позволяет определить пошаговое изменение вероятностей состояний от начального к установившемуся конечному. Такие процессы принято называть процессами с дискретным временем (хотя время при этом в явном виде отсутствует), а если вероятности переходов $\{p_{ij}\}$ не меняются при изменении вероятностей состояний, то марковская цепь считается *однородной*, в противном случае — *неоднородной*.

Цепи Маркова нашли широкое применение на практике, в частности, для оценки состояний СППЗ [15, 16]. Также была теоретически обоснована возможность учета влияния и предыдущих состояний на переход из одного состояния в другое, в результате чего появился термин «полумарковские цепи» [17, 18]. Однако оперирование вероятностями переходов $\{p_{ij}\}$ представляет некоторую трудность: во-первых, не всегда возможно объективно определить эти вероятности, что вносит погрешность в оценку вероятностей состояний $\{S\}$, во-вторых, пошаговый процесс нахождения численных значений вероятностей состояний [8] трудоемкий и требует использования компьютерных средств, в-третьих, важно знать динамику изменения вероятностей состояний исследуемой системы как функцию времени t .

В этой связи гениальный советский математик Андрей Николаевич Колмогоров (1903–1987) в конце 20-х – начале 30-х гг. XX в. предложил свой подход, позволивший перейти от вероятностей переходов $\{p_{ij}\}$ к *интенсивностям* переходов $\{\lambda_{ij}\}$ (их можно интерпретировать как число событий в единицу времени), что в свою очередь позволило перейти к процессу с *непрерывным временем*, который описывается системой из n обыкновенных дифференциальных уравнений 1-го порядка:

$$\begin{cases} \frac{dp_1}{dt} = f_1(\lambda_{ij}, p_k); \\ \dots \\ \frac{dp_n}{dt} = f_n(\lambda_{ij}, p_k) \end{cases} \quad (1)$$

(для справки $\sum_{i=1}^n p_i = 1$).

³ ГОСТ Р 59636–2021. Национальный стандарт Российской Федерации. Установки пожаротушения автоматические. Руководство по проектированию, монтажу, техническому обслуживанию и ремонту. Методы испытаний на работоспособность (утв. и введен в действие Приказом Росстандарта от 24.08.2021 № 789-ст).

⁴ СП 485.1311500.2020. Системы противопожарной защиты. Установки пожаротушения автоматические. Нормы и правила проектирования. Утв. Приказом МЧС России от 31.08.2020 г. № 628.

⁵ СП 3.13130.2009. Системы противопожарной защиты. Система оповещения и управления эвакуацией людей при пожаре. Требования пожарной безопасности. Утв. и введен в действие приказом МЧС РФ от 25.03.2009 г. № 173.

⁶ СП 7.13130.2013. Отопление, вентиляция и кондиционирование. Требования пожарной безопасности. Утв. приказом МЧС РФ от 21.02.2013 г. № 116.

⁷ ГОСТ Р 22.7.01–2021. Национальный стандарт РФ. Безопасность в ЧС. Единая дежурно-диспетчерская служба. Основные положения.

Решение уравнений (1) при соответствующих начальных условиях позволяет найти динамику вероятностей состояний $p_1(t), \dots, p_n(t)$ и решать тем самым прикладные задачи, например оценить эффективность СППЗ. Следует отметить, что в ряде случаев решение уравнений (1) может быть получено в *аналитическом* (!) виде. На практике интерес представляет и нахождение вероятностей $p_1, \dots, p_n$ при установившемся режиме работы исследуемой системы, когда производные в левой части уравнений (1) равны 0. Тогда система дифференциальных уравнений (1) превращается в систему линейных алгебраических уравнений, что значительно упрощает расчеты. Вышеописанный подход нашел широкое применение в теории массового обслуживания [8, 19].

В данной статье представляется целесообразным рассмотреть применение однородной марковской цепи с непрерывным временем для исследования процесса эксплуатации АУП. В качестве примера была взята полумарковская цепь с шестью ($n = 6$) состояниями, приведенными в табл. 1, а граф переходов для которой представлен на рис. 2, а.

Система дифференциальных уравнений Колмогорова для полумарковской цепи [20], граф переходов которой приведен на рис. 2, а, имеет вид:

$$\left\{ \begin{array}{l} \frac{dp_1}{dt} = -(\lambda_{12} + \lambda_{15})p_1 + \lambda_{21}p_2 + \lambda_{61}p_6; \\ \frac{dp_2}{dt} = \lambda_{12}p_1 - (\lambda_{21} + \lambda_{24})p_2; \\ \frac{dp_3}{dt} = -\frac{\lambda}{36}p_3 + \frac{\lambda}{43}p_4 + \frac{\lambda}{53}p_5; \\ \frac{dp_4}{dt} = \lambda_{24}p_2 - \lambda_{43}p_4; \\ \frac{dp_5}{dt} = \lambda_{15}p_1 - \lambda_{53}p_5; \\ \frac{dp_6}{dt} = \lambda_{36}p_3 - \lambda_{61}p_6, \end{array} \right. \quad (2)$$

где $\lambda_{12}, \lambda_{15}, \lambda_{21}, \lambda_{24}, \lambda_{36}, \lambda_{43}, \lambda_{53}, \lambda_{61}$ — интенсивности переходов, имеющие размерность, обратную единицам времени; сумма вероятностей $p_1 + p_2 + p_3 + p_4 + p_5 + p_6 = 1$.

Поскольку решение системы дифференциальных уравнений (2) при начальных условиях $p_1(0) = 1, p_2(0) = \dots = p_6(0) = 0$ возможно только численными методами, интерес представляет рассмотрение установившегося режима эксплуатации, когда производ-

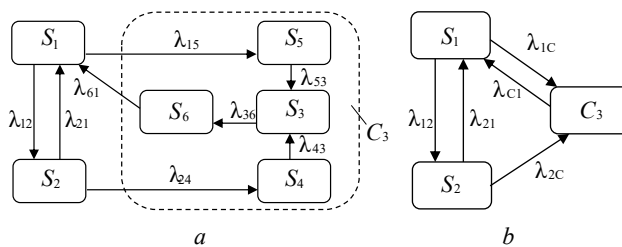


Рис. 2. Графы переходов — исходный (а) и оптимизированный (б)

Fig. 2. Transition graphs — initial (a) and optimized (b)

Таблица 1. Возможные состояния модульной АУП при ее эксплуатации

Table 1. Possible states of the modular automatic fire extinguishing systems (AFES) during its operation

Состояния Condition	Пояснение Explanation	Примечание Note
S_1	Нормальное функционирование — АУП в готовности Normal operation — AFES is ready	Рис. 2, а Fig. 2, a
S_2	Выведение АУП из эксплуатации, например, по причине ремонтных работ на защищаемом объекте Decommissioning of the AFES, for example, due to repair work on the protected object	
S_3	Проведение комплекса проверок АУП Conducting a set of inspections of the AFES	
S_4	Замена ОТВ и/или блоков, например, по причине истечения гарантийного срока Replacement of fire extinguishing agent and/or blocks, for example, due to expiration of the warranty period	
S_5	Восстановление АУП после срабатывания, либо замена АУП или ее блоков Restoration of the AFES after activation or replacement of the AFES or its blocks	
S_6	Установка АУП на защищаемом объекте Installation of the AFES on a protected object	
C_3	Обобщенное состояние, включающее состояния S_3/S_6 A generalized state that includes states S_3/S_6	Рис. 2, б Fig. 2, b

ные в левой части уравнений (2) равны 0. Тогда из (2) получаем систему из 6 линейных алгебраических уравнений:

$$\begin{cases} 0 = -(\lambda_{12} + \lambda_{15})p_1 + \lambda_{21}p_2 + \lambda_{61}p_6; \\ 0 = \lambda_{12}p_1 - (\lambda_{21} + \lambda_{24})p_2; \\ 0 = -\lambda_{36}p_3 + \lambda_{43}p_4 + \lambda_{53}p_5; \\ 0 = \lambda_{24}p_2 - \lambda_{43}p_4; \\ 0 = \lambda_{15}p_1 - \lambda_{53}p_5; \\ 0 = \lambda_{36}p_3 - \lambda_{61}p_6. \end{cases} \quad (3)$$

Нелишне отметить, что правильность составления систем уравнений (2) и (3) может быть проконтролирована использованием табл. 2, куда помещены правые части этих систем уравнений: сумма столбцов в этой таблице должна быть нулевой. Как видим из табл. 2, системы уравнений (2) и (3) составлены правильно.

В рамках проведенного исследования удалось получить *явные* аналитические выражения для системы алгебраических уравнений (3):

$$\begin{cases} p_1 = \frac{\lambda_{21} + \lambda_{24}}{\lambda_{12}(1 + \lambda_{24}T_1) + (\lambda_{21} + \lambda_{24})(1 + \lambda_{15}T_2)}; \\ p_2 = \frac{\lambda_{12}}{\lambda_{21} + \lambda_{24}}p_1; \\ p_3 = \frac{1}{\lambda_{36}}\left(\lambda_{12} + \lambda_{15} - \frac{\lambda_{12}\lambda_{21}}{\lambda_{21} + \lambda_{24}}\right)p_1; \\ p_4 = \frac{\lambda_{24}}{\lambda_{43}} \cdot \frac{\lambda_{12}}{\lambda_{21} + \lambda_{24}}p_1; \\ p_5 = \frac{\lambda_{15}}{\lambda_{53}}p_1; \\ p_6 = \frac{1}{\lambda_{61}}\left(\lambda_{12} + \lambda_{15} - \frac{\lambda_{12}\lambda_{21}}{\lambda_{21} + \lambda_{24}}\right)p_1, \end{cases} \quad (4)$$

где $T_1 = \lambda_{43}^{-1} + \lambda_{36}^{-1} + \lambda_{61}^{-1}$, $T_2 = \lambda_{53}^{-1} + \lambda_{36}^{-1} + \lambda_{61}^{-1}$.

При желании можно убедиться в выполнении условия: $p_1 + p_2 + p_3 + p_4 + p_5 + p_6 = 1$.

Следует также отметить, что для оценки эффективности эксплуатации АУП наиболее значимой будет вероятность p_1 состояния S_1 готовности АУП к применению. Для установившегося режима величину p_1 можно найти по первому выражению из (4) при заданных интенсивностях λ_{12} , λ_{15} , λ_{21} , λ_{24} , λ_{36} , λ_{43} , λ_{53} , λ_{61} .

Однако особый интерес представляет динамика вероятности $p_1(t)$. Как показано ранее, ее можно оценить путем численного решения системы дифференциальных уравнений (2), но в данной работе представлен метод получения *аналитического* выражения для динамики вероятности $p_1(t)$. Для этого граф переходов на рис. 2, а следует оптимизировать, сведя его к трехвершинному графу (рис. 2, б) и введя условное состояние C_3 , включающее в себя четыре исходных состояния S_3/S_6 . Оптимизированному графу переходов будет соответствовать система дифференциальных уравнений:

$$\begin{cases} \frac{dp_1}{dt} = -(\lambda_{12} + \lambda_{15})p_1 + \lambda_{21}p_2 + \lambda_{1C}p_{c3}; \\ \frac{dp_2}{dt} = \lambda_{12}p_1 - (\lambda_{21} + \lambda_{24})p_2; \\ \frac{dp_{c3}}{dt} = \lambda_{C1}p_1 + \lambda_{2C}p_2 - \lambda_{1C}p_{c3}, \end{cases} \quad (5)$$

где p_{c3} — вероятность состояния C_3 ; λ_{C1} , λ_{2C} , λ_{1C} — интенсивности переходов. Очевидно, $p_1 + p_2 + p_{c3} = 1$. Начальные условия, как и ранее: $p_1(0) = 1$, $p_2(0) = p_{c3}(0) = 0$.

Поскольку переходы из состояний S_1 и S_2 в состояние C_3 не зависят от этого состояния, можно положить $\mu_{13} = \lambda_{15}$ и $\mu_{23} = \lambda_{24}$. Из условия соответствия вероятностей: p_1 и p_2 из исходного графа (см. рис. 2, а) вероятностям p_1 и p_2 из оптимизированного графа (рис. 2, б), интенсивность перехода μ_{31} из состояния C_3 может быть найдена из выражения:

$$\mu_{31} = \frac{\lambda_{12}\lambda_{24} + \lambda_{15}(\lambda_{21} + \lambda_{24})}{\lambda_{12}\lambda_{24}T_1 + \lambda_{15}(\lambda_{21} + \lambda_{24})T_2}. \quad (6)$$

Таблица 2. Матрица оценки правильности систем уравнений (2) и (3)

Table 2. Correctness evaluation matrix of the systems of equations (2) and (3)

Номер Number	1	2	3	4	5	6
1	$-\lambda_{12} - \lambda_{15}$	λ_{21}	0	0	0	λ_{61}
2	λ_{12}	$-\lambda_{21} - \lambda_{24}$	0	0	0	0
3	0	0	$-\lambda_{36}$	λ_{43}	λ_{53}	0
4	0	λ_{24}	0	$-\lambda_{43}$	0	0
5	λ_{15}	0	0	0	$-\lambda_{53}$	0
6	0	0	λ_{36}	0	0	$-\lambda_{61}$
Σ	0	0	0	0	0	0

Тогда после преобразований выражений (5) может быть получено линейное дифференциальное уравнение 2-го порядка:

$$\frac{d^2 p_1}{dt^2} + \Lambda_0 \frac{dp_1}{dt} + (\Lambda_1 + \Lambda_2 + \Lambda_3) p_1 = \Lambda_1, \quad (7)$$

где

$$\Lambda_0 = \lambda_{12} + \lambda_{15} + \lambda_{21} + \lambda_{24} + \lambda_{1C};$$

$$\Lambda_1 = \lambda_{1C}(\lambda_{21} + \lambda_{24});$$

$$\Lambda_2 = \lambda_{1C}\lambda_{12};$$

$$\Lambda_3 = \lambda_{15}(\lambda_{21} + \lambda_{24}) + \lambda_{12}\lambda_{24}.$$

Решение уравнения (8) при начальных условиях $p_1(0) = 1$ и $p_1'(0) = -\lambda_{12} - \lambda_{15}$ имеет вид:

$$p_1(t) = C_1 \exp(k_1 t) + C_2 \exp(k_2 t) + \frac{\Lambda_1}{\Lambda_1 + \Lambda_2 + \Lambda_3}, \quad (8)$$

где

$$k_1 = -0,5 \left(\Lambda_0 - \sqrt{\Lambda_0^2 - 4(\Lambda_1 + \Lambda_2 + \Lambda_3)} \right);$$

$$k_2 = -0,5 \left(\Lambda_0 + \sqrt{\Lambda_0^2 - 4(\Lambda_1 + \Lambda_2 + \Lambda_3)} \right);$$

$$\begin{bmatrix} C_1 \\ C_2 \end{bmatrix} = \frac{\Lambda_2 + \Lambda_3}{(\Lambda_1 + \Lambda_2 + \Lambda_3)(k_1 - k_2)} \begin{bmatrix} k_2 \\ k_1 \end{bmatrix} \pm \frac{\lambda_{12} + \lambda_{15}}{k_1 - k_2}.$$

Для вероятностей p_2 и p_{c3} при установившемся режиме ($t \rightarrow \infty$) будут справедливы выражения:

$$\begin{bmatrix} p_2 \\ p_{c3} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \Lambda_2 \\ \Lambda_3 \end{bmatrix} (\Lambda_1 + \Lambda_2 + \Lambda_3)^{-1}. \quad (9)$$

Результаты и обсуждение

Возможности данного подхода могут быть проиллюстрированы на примере определения вероятностей состояний СППЗ в соответствии с табл. 1 и графом на рис. 2. Пусть известны следующие значения интенсивностей переходов (данные условные): $\lambda_{12} = 0,01 \text{ сут}^{-1}$, $\lambda_{15} = 0,003 \text{ сут}^{-1}$, $\lambda_{21} = 4 \text{ сут}^{-1}$, $\lambda_{24} = 0,03 \text{ сут}^{-1}$, $\lambda_{36} = 8 \text{ сут}^{-1}$, $\lambda_{43} = 2 \text{ сут}^{-1}$, $\lambda_{53} = 1 \text{ сут}^{-1}$, $\lambda_{61} = 5 \text{ сут}^{-1}$.

Тогда, проведя расчеты в соответствии с выражениями (4) для стационарного режима (ввиду ограниченности объема статьи приводятся только результаты), получаем значения вероятностей состояний: $p_1 = 0,993524$; $p_2 = 0,002465$; $p_3 = 0,000382$; $p_4 = 0,000037$; $p_5 = 0,002981$; $p_6 = 0,000611$. Таким образом, в установившемся режиме работы при вышеприведенных интенсивностях вероятность

Таблица 3. Динамика вероятностей состояний в соответствии с графом на рис. 2, б

Table 3. Dynamics of state probabilities in accordance with the graph in Fig. 2, b

lg t, сут lg t, days	p_1	p_2	p_{c3}
< - 5	1.00000	.000000	.000000
-2,0	.999872	.000098	.000030
-1,7	.999748	.000192	.000060
-1,3	.999400	.000453	.000148
-1,0	.998887	.000823	.000290
-0,7	.998068	.001371	.000560
-0,3	.996592	.002145	.001263
0,0	.995438	.002427	.002135
0,3	.994396	.002467	.003137
0,7	.993612	.002466	.003922
1,0	.993526	.002465	.004008
∞	.993525	.002465	.004010

нахождения АУП в готовности к применению 99,35 %. Если данный уровень готовности требуется повысить еще более, то на основе 1-го выражения в (4) следует либо увеличить интенсивности λ_{21} и λ_{24} , либо снизить интенсивности λ_{12} и λ_{15} .

Особый интерес представляет оценка динамики вероятности $p_1(t)$ готовности АУП к применению. С учетом вышеприведенных интенсивностей (в том числе $\mu_{31} = 0,7617$) выражение (8) принимает вид:

$$p_1(t) = 0,00418 \exp(-0,7645t) + 0,002457 \exp(-4,0399t) + 0,993525. \quad (10)$$

Аналогичное выражение было получено и для динамики вероятности состояния S_2 :

$$p_2(t) = 1,231 \cdot 10^{-5} \exp(-0,7645t) - 0,002478 \exp(-4,0399t) + 0,002465. \quad (11)$$

Динамика вероятностей $p_1(t)$, $p_2(t)$ и $p_{c3}(t)$, соответствующих графу на рис. 2, б, приведена в табл. 3.

Выводы

Таким образом, в статье приведены основные положения теории цепей Маркова, и на примере процесса эксплуатации АУП (режим готовности, временного отключения, срабатывания, восстановления готовности и тестирования) показана возможность описания этого процесса с помощью полумарковской цепи для оценки вероятностей состояний АУП. Также показана возможность оптимизации цепи с целью ее упрощения и получения аналитических выражений динамики вероятностей состояний. Представленный подход может быть использован другими исследователями для решения аналогичных задач.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. *Alpert R.L.* Ceiling jet flows. *SFPE handbook of fire protection engineering*. 3rd ed. NFPA, 2002. Pp. 2–18 – 2–31. DOI: 10.1007/978-1-4939-2565-0_14
2. Бондар А.И., Мешалкин Е.А., Танклевский Л.Т., Таранцев А.А., Цариченко С.Г. Об особенностях применения автоматических установок сдерживания пожара // *Пожаровзрывобезопасность/Fire and explosion safety*. 2019. № 6. Т. 28. С. 71–79. DOI: 10.18322/PVB.2019.28.06.71-79
3. Markus E., Snegirev A., Kuznetsov E., Tanklevskiy L. Application of the thermal pyrolysis model to predict flame spread over continuous and discrete fire load // *Fire Safety Journal*. 2019. Vol. 108. P. 102825. DOI: 10.1016/j.firesaf.2019.102825
4. Маркус Е.С., Снегирев А.Ю., Кузнецов Е.А., Танклевский Л.Т., Аракчеев А.В. Численное моделирование распространения пламени по дискретной совокупности горючих материалов // *Пожаровзрывобезопасность/Fire and Explosion Safety*. 2019. Т. 28. № 4. С. 29–41. DOI: 10.18322/PVB.2019.28.04.29-41
5. Илюшов Н.Я. Автоматические установки пожаротушения. Новосибирск : Изд-во НГТУ, 2016. 134 с.
6. Kobayashi Y., Terashima K., Oiwa R., Tokoro M., Takahashi S. Opposed-flow flame spread over carbon fiber reinforced plastic under variable flow velocity and oxygen concentration: the effect of in-plane thermal isotropy and anisotropy // *Proceedings of the Combustion Institute*. 2021. Vol. 38. No. 3. Pp. 4857–4866. DOI: 10.1016/J.PROCI.2020.06.380
7. Gao S., Zhu G., Gao Y., Zhou J. Experimental study on width effects on downward flame spread over thin PMMA under limited distance condition // *Case Studies in Thermal Engineering*. 2018. Vol. 13. P. 100382. DOI: 10.1016/j.csite.2018.100382
8. Вентцель Е.С. Исследование операций. М. : Сов. радио, 1972. 552 с.
9. Кемени Д., Снелл Д. Конечные цепи Маркова. М. : Наука, 1970. 271 с.
10. Романюк Е.В. Вероятностная модель управления технологическим процессом на основе Марковской цепи // *Моделирование сложных процессов и систем : сб. тр. секции № 10 XXXII Междунар. науч.-практ. конф. Химки : Академия гражданской защиты МЧС России, 2022. С. 57–60.*
11. Poznyak A.S., Najim K., Gomez-Ramirez E. Self-learning control of finite Markov chains // *International Journal of Adaptive Control and Signal Processing*. 2018. No. 17 (10). Pp. 801–803. DOI: 10.1002/acs.782
12. Gagnius Paul A. Markov chains: from theory to implementation and experimentation. USA, NJ : John Wiley & Sons, 2017. Pp. 2–8. DOI: 10.1002/9781119387596
13. Кельберт М.Я., Сухов Ю.М. Вероятность и статистика в примерах и задачах. Т. II: Марковские цепи как отправная точка теории случайных процессов и их приложения. М. : МЦНМО, 2010. 295 с.
14. Танклевский Л.Т., Таранцев А.А., Зыбина О.А. Применение марковских цепей к задачам поддержания готовности организационных и технических систем // *XXI век: итоги прошлого проблемы настоящего плюс*. 2023. № 2 (62). Т. 12. С. 26–34.
15. Танклевский Л.Т., Таранцев А.А., Бабинов И.А. Метод управления поддержанием готовности средств противопожарной защиты с использованием марковских цепей // *Вестник Санкт-Петербургского университета ГПС МЧС России*. 2022. № 4. С. 60–69.
16. Марков А.А. Распространение закона больших чисел на величины, зависящие друг от друга // *Известия физико-математического общества при Казанском университете*. 2-я серия. 1906. Т. 15. С. 135–156.
17. Королюк В.С., Броди С.М., Турбин А.Ф. Полумарковские процессы и их применения // *Итоги науки и техники: Сер. Теория вероятностей. Математическая статистика. Теоретическая кибернетика*. 1974. Т. 11. С. 47–97.
18. Краснов А.Ю. Статистические методы в инженерных исследованиях. СПб. : Университет ИТМО, 2022. 119 с.
19. Таранцев А.А. Инженерные методы теории массового обслуживания : 2-е изд. СПб. : Наука, 2007. 176 с.
20. Афанасьевский Л.Б., Горин А.Н., Чурсин М.А. Имитационное моделирование полумарковских процессов в системах с дискретными состояниями и непрерывным временем // *Вестник Воронежского государственного университета. Серия: Системный анализ и информационные технологии*. 2019. № 3. С. 42–52.

REFERENCES

1. Alpert R.L. Ceiling Jet Flows. *SFPE Handbook of Fire Protection Engineering*. 3rd ed., NFPA. 2002; 2-18-2-31. DOI: 10.1007/978-1-4939-2565-0_14
2. Bondar A.I., Meshalkin E.A., Tanklevskiy L.T., Tarantsev A.A., Tsarichenko S.G. About the features of the use of automatic combat fire installations. *Fire and explosion safety*. 2019; 6(28):71-79. DOI: 10.18322/PVB.2019.28.06.71-79 (rus).

3. Markus E., Snegirev A., Kuznetsov E., Tanklevskiy L. Application of the thermal pyrolysis model to predict flame spread over continuous and discrete fire load. *Fire Safety Journal*. 2019; 108:102825. DOI: 10.1016/j.fire-saf.2019.102825
4. Markus E.S., Snegirev A.Yu., Kuznetsov E.A., Tanklevsky L.T., Arakcheev A.V. Numerical modeling of flame propagation over a discrete set of combustible materials. *Pozharovzryvobezopasnost'/Fire and Explosion Safety*. 2019; 28(4):29-41. DOI: 10.18322/PVB.2019.28.04.29-41 (rus).
5. Ilyushov N.Ya. *Automatic fire extinguishing installations*. Novosibirsk, NSTU Publishing House, 2016; 134. (rus).
6. Kobayashi Y., Terashima K., Oiwa R., Tokoro M., Takahashi S. Opposed-flow flame spread over carbon fiber reinforced plastic under variable flow velocity and oxygen concentration: the effect of in-plane thermal isotropy and anisotropy. *Proceedings of the Combustion Institute*. 2021; 38(3):4857-4866. DOI: 10.1016/J.PROCI.2020.06.380
7. Gao S., Zhu G., Gao Y., Zhou J. Experimental study on width effects on downward flame spread over thin PMMA under limited distance condition. *Case Studies in Thermal Engineering*. 2018; 13:100382. DOI: 10.1016/j.csite.2018.100382
8. Ventzel E.S. *Operations Research*. Moscow, Sov. Radio Publ., 1972; 552. (rus).
9. Kemeny D., Snell D. *Finite Markov chains*. Moscow, Nauka Publ., 1970; 271. (rus).
10. Romaniuk E.V. Probabilistic model of technological process control on the basis of Markov chain. *Modeling of complex processes and systems : Proceedings of the section № 10 of the XXXII International Scientific and Practical Conference*. Khimki, Academy of Civil Protection of EMERCOM of Russia, 2022; 57-60. (rus).
11. Poznyak A.S., Najim K., Gomez-Ramirez E. Self-learning control of finite Markov chains. *CRC Press*. 2018; 17(10):801-803. DOI: 10.1002/acs.782
12. Gagniuc Paul A. *Markov chains: from theory to implementation and experimentation*. USA, NJ, John Wiley & Sons, 2017; 2-8. DOI: 10.1002/9781119387596
13. Kelbert M.Y., Sukhov Y.M. *Probability and Statistics in Examples and Problems. Vol. II: Markov chains as a starting point of the theory of random processes and their applications*. Moscow, MCNMO, 2010; 295. (rus).
14. Tanklevskiy L.T., Tarantsev A.A., Zybina O.A. Application of Markov chains to the tasks of maintaining the readiness of organizational and technical systems. *XXI Century: Resumes of the Past and Challenges of the Present plus*. 2023; 2(62):12:26-34. (rus).
15. Tanklevskiy L.T., Tarantsev A.A., Babikov I.A. Control method for maintaining the readiness of fire protection equipment using Markov chains. *Bulletin of the St. Petersburg University of the Ministry of Emergency Situations of Russia*. 2022; 4:60-69. (rus).
16. Markov A.A. Spreading of the law of large numbers on the values depending on each other. *News of the Physics and Mathematics Society at Kazan University. 2nd series*. 1906; 15:135-156. (rus).
17. Korolyuk V.S., Brody S.M., Turbin A.F. Semi-Markov processes and their applications. *Results of science and technology: Ser. Probability theory. Mathematical statistics. Theoretical Cybernetics*. 1974; 11:47-97. (rus).
18. Krasnov A.Yu. *Statistical Methods in Engineering Research*. Saint Petersburg, ITMO University, 2022; 119. (rus).
19. Tarantsev A.A. *Engineering methods of mass service theory. 2nd ed.* Saint Petersburg, Nauka Publ., 2007; 176. (rus).
20. Afanasyevsky L.B., Gorin A.N., Chursin M.A. Simulation modeling of semi-Markov processes in systems with discrete states and continuous time. *Bulletin of the Voronezh State University. Ser. System analysis and information technology*. 2019; 3:42-52. (rus).

Поступила 20.01.2024, после доработки 16.02.2024;

принята к публикации 06.03.2024

Received January 20, 2024; Received in revised form February 16, 2024;

Accepted March 6, 2024

Информация об авторах

ТАНКЛЕВСКИЙ Леонид Тимофеевич, д-р техн. наук, профессор, заведующий кафедрой Высшей школы техносферной безопасности, Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого, Россия, 195251, г. Санкт-Петербург, ул. Политехническая, 29; РИНЦ ID: 181476; Scopus AuthorID: 57192367552; ResearcherID: S-1901-2017; ORCID: 0000-0002-2769-0086; e-mail: tanklevskiy@gefest-spb.ru

ТАРАНЦЕВ Александр Алексеевич, д-р техн. наук, профессор, заведующий лабораторией, Институт проблем транспорта им. Н.С. Соломенко Российской академии наук, Россия,

Information about authors

Leonid T. TANKLEVSKIY, Dr. Sci. (Eng.), Professor, Head of Department of Higher School of Technosphere Safety, Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University, Polytechnicheskaya St., 29, Saint Petersburg, 195251, Russian Federation; ID RISC: 181476; Scopus AuthorID: 57192367552; ResearcherID: S-1901-2017; ORCID: 0000-0002-2769-0086; e-mail: tanklevskiy@gefest-spb.ru

Alexander A. TARANTSEV, Dr. Sci. (Eng.), Professor, Head of Laboratory, Solomenko Institute of Transport Problems of the Russian Academy of Sciences, 12th Line VO, 13, Saint

199178, г. Санкт-Петербург, 12-я линия ВО, 13; РИНЦ ID: 664653; Scopus AuthorID: 57195636448; ResearcherID: K-2087-2018; ORCID: 0000-0003-1561-2483; e-mail: t__54@mail.ru

Petersburg, 199178, Russian Federation; ID RISC: 664653; Scopus AuthorID: 57195636448; ResearcherID: K-2087-2018; ORCID: 0000-0003-1561-2483; e-mail: t__54@mail.ru

БАЛАБАНОВ Иван Дмитриевич, аспирант, Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого, Россия, 195251, г. Санкт-Петербург, ул. Политехническая, 29; РИНЦ ID: 980446; Scopus AuthorID: 57212561809; ResearcherID: GQH-8479-2022; ORCID: 0000-0002-1616-3504; e-mail: bid_home@mail.ru

Ivan D. BALABANOV, Postgraduate Student, Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University, Polytechnicheskaya St., 29, Saint Petersburg, 195251, Russian Federation; ID RISC: 980446; Scopus AuthorID: 57212561809; ResearcherID: GQH-8479-2022; ORCID: 0000-0002-1616-3504; e-mail: bid_home@mail.ru

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

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.*

Вопрос о перспективах развития интеллектуальных пожарных извещателей

Станислав Александрович Ермаков ✉, Владислав Васильевич Димитрюк,
Сергей Михайлович Жданов, Александр Андреевич Фадеев

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

АННОТАЦИЯ

Введение. Современные технологии в системах пожарной автоматики играют важную роль в предупреждении и быстром обнаружении пожаров. Неработающая или некорректно функционирующая техника и технология часто становятся основной причиной возникновения пожара. Однако внимание отечественных авторов к обозначению трендов интеллектуальных пожарных извещателей оказывается недостаточным и статья имеет целью освещение данного вопроса. Решены соответствующие задачи по определению системы пожарной автоматики и роли извещателей в ее функционировании по выявлению основных направлений исследований актуальных отечественных и зарубежных публикаций, касающиеся применения искусственного интеллекта и интернета вещей в системе пожарной автоматики. Наличие точных показателей и возможность корректировки параметров позволяют обеспечить высокий уровень безопасности процесса и при необходимости вовремя реагировать.

Аналитическая часть. Рассмотрены интеллектуальные пожарные извещатели, основанные на таких средствах и технологиях, как машинное обучение и искусственный нос, а также их применение в обнаружении опасных факторов пожара. Представлены схемы и данные использования пожарных извещателей. Проанализированы условия безопасности на разных уровнях, предложены методы преобразования сигналов, поступающих от пожарных извещателей, и варианты интеграции электронного носа и тепловизионных камер в систему пожарной автоматики. Кроме того, отмечены преимущества использования искусственного носа, машинного зрения и микросенсорных кластеров в обеспечении пожарной безопасности.

Выводы. Использование интеллектуальных пожарных извещателей значительно повышает эффективность и надежность системы пожарной автоматики. Результаты работы будут полезны исследователям, разработчикам и инженерам системы пожарной автоматики, студентам направлений подготовки 20.03.01 «Техносферная безопасность» и 27.03.01 «Стандартизация и метрология», а также при изучении дисциплины «Интеллектуальные системы измерения, контроля качества и сертификации продукции» по направлению подготовки 27.04.02 «Управление качеством».

Ключевые слова: искусственный нос; машинное зрение; система пожарной автоматики; опасные факторы пожара; безопасность объекта

Для цитирования: Ермаков С.А., Димитрюк В.В., Жданов С.М., Фадеев А.А. Вопрос о перспективах развития интеллектуальных пожарных извещателей // Пожаровзрывобезопасность/Fire and Explosion Safety. 2024. Т. 33. № 2. С. 68–76. DOI: 10.22227/0869-7493.2024.33.02.68-76

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

Prospects for development of intelligent fire detectors

Stanislav A. Ermakov ✉, Vladislav V. Dimitryuk, Sergey M. Zhdanov, Aleksandr A. Fadeev

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

ABSTRACT

Introduction. Advanced technologies, integrated into automatic fire fighting systems, are vital for prevention and fast detection of fires. Non-functional or malfunctioning equipment and technology often become the main cause of fire. However, trends in intelligent fire detectors enjoy insufficient attention of domestic authors. Therefore, the article focuses on this issue. Relevant tasks are solved to study automatic fire fighting systems and the role of detectors in their operation, to identify the main areas of research addressed by relevant domestic and foreign publications. The availability of accurate values and adjustability of parameters ensure high process safety and a good response time, if needed.

Analysis. Intelligent detectors, taking advantage of such tools and technologies as machine learning and electronic nose, their application in fire hazard detection are considered. Diagrams and data, describing the use of

fire detectors, are presented. Different levels of safety conditions are analyzed. Methods for converting signals, coming from detectors, as well as options for integrating electronic nose techniques and thermal imaging cameras into automatic fire fighting systems are proposed. In addition, authors emphasize the benefits of electronic nose, machine vision, and micro-sensor clusters in fire safety assurance.

Conclusions. Intelligent fire detectors skyrocket the efficiency and reliability of automatic fire fighting systems. The authors' findings will be helpful for researchers, engineers and designers of automatic fire fighting systems, students majoring in 20.03.01 Technosphere Safety, 27.03.01 Standardization and Metrology, students majoring in 27.04.02 Intelligent Measurement Systems for Quality Management, Quality Control and Product Certification.

Keywords: electronic nose; machine vision; automatic fire fighting systems; fire danger factors; facility safety

For citation: Ermakov S.A., Dmitryuk V.V., Zhdanov S.M., Fadeev A.A. Prospects for development of intelligent fire detectors. *Pozharovzryvobezопасnost/Fire and Explosion Safety*. 2024; 33(2):68-76. DOI: 10.22227/0869-7493.2024.33.02.68-76 (rus).

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

Введение

Цель исследования состоит в определении трендов интеллектуальных пожарных извещателей. В связи с этим решаются следующие задачи:

- обозначить систему пожарной автоматики и место в ней извещателей;
- выявить основные направления актуальных отечественных и зарубежных публикаций, связанных с возможным использованием искусственного интеллекта и интернета вещей в системе пожарной автоматики.

При расследовании несчастных случаев при пожаре основной причиной их возникновения считается объективный фактор, к которому относят состояние техники и технологии.

Современные технологии и развитие цифровой среды ставят перед обществом новые вызовы в области обеспечения пожарной безопасности. В связи с этим повышение эффективности и оперативности процессов контроля и предотвращения пожаров становится актуальной проблемой.

Интеллектуальные извещатели нашли свое применение в этой сфере, предоставляя возможность быстрого обнаружения опасных факторов пожара и поддерживая высокий уровень безопасности. Однако развитие этих устройств подвержено некоторым ограничениям. Мировой рынок средств обнаружения пожара вырастет с 7,82 млрд долл. в 2022 г. до 8,71 млрд долл. в 2023 г.¹

В концепцию интеграции нескольких информационных и коммуникационных технологий для безопасного функционирования городской инфраструктуры, которую называют «умный город», входят «умные здания и инфраструктура» и «умная безопасность» [1].

Обеспечение безопасности объекта и его качества требуют постоянного контроля или поддержания рациональных параметров в процессе

обслуживания. Классификация извещателей указана в работах² [2–4]. Сверхраннему обнаружению и сканирующей лазерной технологии уделено внимание в [5]. Интеграция объектно-ориентированной модели строительного объекта и интернета вещей, частью которого являются такие извещатели, представлена в [6].

Основная часть

Был применен системный анализ, абстрагирование, индукция и дедукция, были изучены научные работы по автоматизации систем пожарной защиты.

Примером обеспечения пожарной безопасности могут служить противопожарная сигнализация и соответствующее срабатывание извещателей, которые используются для обнаружения опасных факторов пожара, таких как пламя и искры, тепловой поток, повышение температуры окружающей среды, повышение концентрации токсичных продуктов горения и термического разложения (угарный газ, а также мелкодисперсные и твердые частицы, акролеин и циановодород), понижение концентрации кислорода, снижение видимости в дыму. Когда извещатели обнаруживают пламя, высокую температуру или утечку газа, они могут немедленно активировать устройство отключения газа [6, 7]. Совмещение автономных пожарных извещателей с бытовыми приборами описано в [8]. Блок-схема электросчетчика-извещателя с подавлением пожарно-электрического вреда и опасных факторов пожара в квартире высотного здания приведена в [9]. В качестве оконечного варианта с целью минимизации ложного срабатывания системы пожарной сигнализации предлагается использовать техническое устройство, реализующее принципы нейронной сети [10]. Выбор правильного числа газоанализаторов, расположение, а также характеристики и компоненты извещателей, листинг

¹ Fire Detection Equipment Global Market Report. URL: <https://www.thebusinessresearchcompany.com/report/fire-detection-equipment-global-market-report> (дата обращения: 23.11.2023).

² Лазаренков А.М., Фасевич Ю.Н. Пожарная безопасность : учебное пособие по дисциплине «Охрана труда». Минск : БНТУ, 2019. 126 с. URL: <https://rep.bntu.by/handle/data/50880> (дата обращения: 17.04.2024).

программы с кодом работы в системе «умный дом» имеются в [11].

Все извещатели (например, термодатчики, камеры, детекторы дыма) для интеллектуального пожаротушения должны быть частью системы автоматизации зданий и сооружений. Многие существующие датчики и сеть могут быть использованы и модернизированы для интеллектуальной системы пожаротушения. Например, существующая система энергосбережения в интеллектуальном здании установит массивные датчики температуры почти во всех помещениях для управления системой кондиционирования воздуха, чтобы обеспечить как комфортную среду в помещении, так и экономию энергии. Эти данные с датчиков температуры также можно собирать и передавать в систему пожарной автоматики. В случае возникновения пожара эти извещатели могут автоматически переключаться в режим высокочастотного сбора и отправлять данные в модель искусственного интеллекта как для визуализации сцены пожара, так и для его прогноза. Более совершенные датчики, такие как инфракрасная камера, лазерный сканер, лидар, датчики газа и видимости, также могут быть установлены в такой инфраструктуре, как туннель, склад, музей и терминал аэропорта, для предоставления большего количества данных о пожаре и поддержки прогноза пожара [12].

Так, система мониторинга тоннелей может быть оснащена функцией изоляции самотестирования неисправностей, которая позволяет регулярно проводить самотестирование, сообщать о причине неисправности, а также вовремя прерывать и корректировать эту систему, что эффективно снижает частоту отказов [13].

В исследовании [14] рассматривается новое применение машинного обучения для обнаружения пожара на основе измерений акустических извещателей.

Интеллектуальные интерфейсы представляют собой специализированные устройства, предназначенные для обеспечения взаимодействия между различными системами и устройствами путем преобразования сигналов из одной формы в другую. Они обеспечивают не только передачу данных, но и обработку полученной информации, что позволяет автоматизировать процессы и обеспечить более эффективное функционирование системы пожарной безопасности.

Основными функциями интеллектуальных интерфейсов являются общение, автоматический синтез программы, обоснование и обучение.

Таким образом, интеллектуальные интерфейсы являются важной составляющей систем пожарной безопасности и выполняют ряд функций, направленных на обеспечение безопасности объекта. Они обеспечивают связь между различными компонен-

тами системы, обработку и анализ информации, а также эффективное управление и контроль.

Умные системы пожарной автоматики предоставляют возможность интегрировать различные компоненты в единую сеть, включая извещатели, оповещатели и системы пожаротушения (рис. 1), что позволяет осуществлять централизованное управление и контроль над всей системой.

Использование интеллектуальных интерфейсов значительно повышает эффективность и надежность систем пожарной безопасности. Они обеспечивают более раннее обнаружение пожаров и позволяют быстро реагировать на них, что существенно снижает риск для жизни и имущества. Кроме того, такие интерфейсы упрощают управление и контроль над системой, делая ее более доступной и удобной для пользователей.

На схеме (рис. 2) изображены интеллектуальные извещатели $D(u, j)$, которые соединены с преобразователем I . Он трансформирует сигнал от датчика в вид

$$D(u, j) \rightarrow d(u, j)$$

и далее с компьютером (микропроцессором) осуществляет контроль и управление (по правилам $R(u, j)_i$ на уровне i) и формирует сообщение $s(u, j)$:

$$s(u, j) = F\{d(u, j), R(u, j)_i\},$$

где функция F соответствует введенной ранее программе с информационным обеспечением, и устанавливает в зависимости от принятых значений



Рис. 1. Роль автоматической пожарной сигнализации в технических системах противопожарной защиты

Fig. 1. The role of automatic fire alarms in fire alarm systems

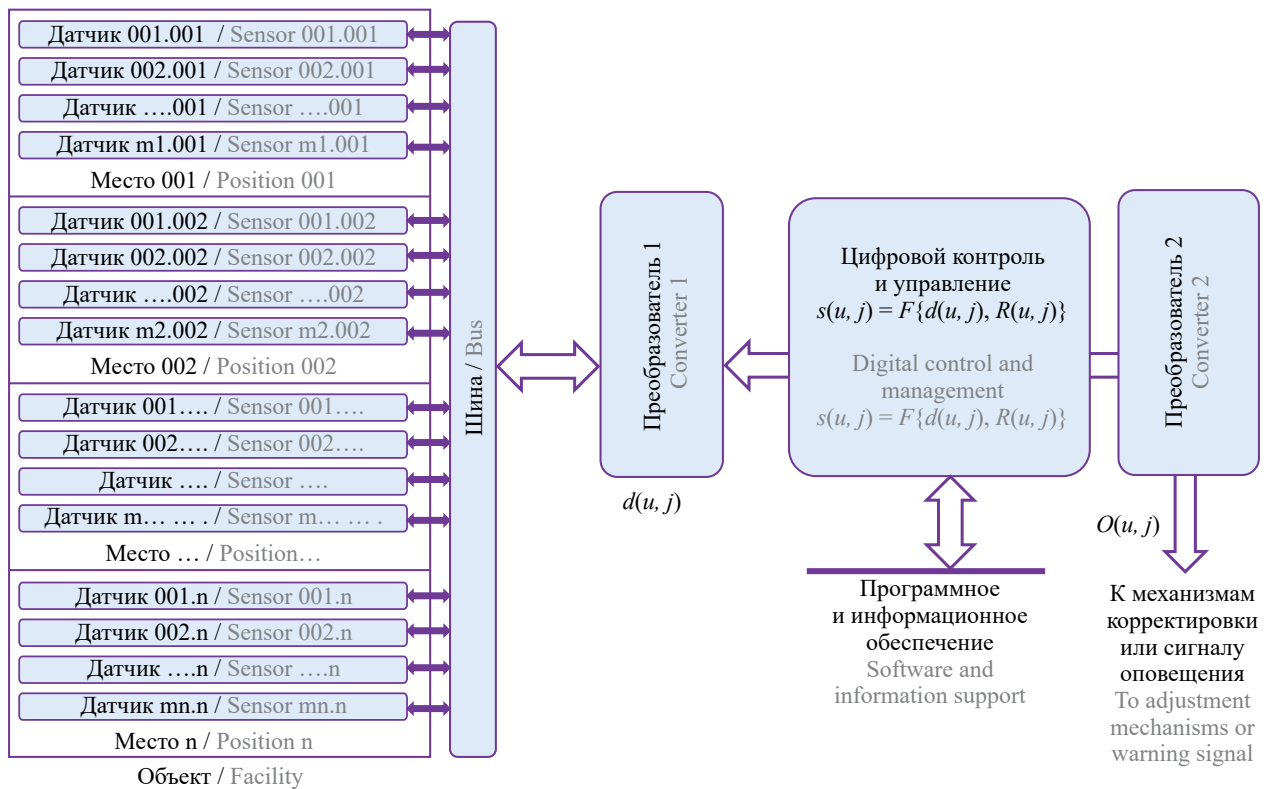


Рис. 2. Взаимодействие интеллектуальных извещателей с другими частями системы пожарной автоматики
Fig. 2. Interaction between intelligent detectors and other components of an automatic firefighting system

параметров и уровня i вид сообщения или значение к действию. Так, если:

$$R(u, j)_i \nless d(u, j)_i \pm c,$$

то условия безопасности на i -м уровне ($i = 1 \dots 5$; при $i = 1$ — безопасно, а при $i = 5$ — наиболее опасно) при допустимой неточности c не обеспечены в i месте объекта извещателя j . При

$$d(u, j) - c < R(u, j)_1$$

имеем безопасные условия, а при

$$d(u, j) + c < R(u, j)_5$$

возникает угроза безопасности.

Сигнал $s(u, j)$ от компьютера через средство и преобразователь 2

$$s(u, j) \rightarrow O(u, j)$$

может поступать на исполнительный механизм оборудования для корректировки контролируемого параметра извещателей (при необходимости) или подавать диспетчеру соответствующий сигнал через оповещатель.

Уровень i служит для обеспечения нескольких уровней безопасности в системе пожаротушения с соответствующими интеллектуальными датчи-

ками и программами, имеющими соответствующее информационное обеспечение и настройку.

Одним из важных элементов системы пожарной безопасности являются контроллеры. Они — центральные устройства, ответственные за обработку и анализ данных от датчиков, за принятие решений и управление другими компонентами системы. Контроллеры обеспечивают координацию и синхронизацию работы всей системы, позволяя ей функционировать эффективно и надежно. Они также предоставляют возможность удаленного доступа и мониторинга системы пожарной безопасности.

Контроллер системы пожарной автоматики предназначается для применения в автоматических системах пожарной сигнализации и пожаротушения на промышленных объектах различного назначения. Данный прибор обеспечивает сбор информации от пожарных извещателей, сигнализаторов, концевых выключателей, а также их электропитание, обработку принятой информации, формирование сигналов управления автоматическими средствами пожаротушения, контроль их состояния, управление оповещателями, выдачу сигналов для включения (отключения) технологического оборудования³.

³ Контроллеры систем пожарной автоматики «СПАРК» на ПЛК GE IP. URL: <https://spetzpozsh.com/catalog/fire-control-systems/fire-automation-controllers-spark-ge-ip/> (дата обращения: 09.12.2023).

Один из существенных типов контроллеров представляют собой нейрокомпьютеры — устройства, способные выполнять вычисления высокой сложности и принимать решения на основе полученных данных. Они используют нейронные сети и другие алгоритмы для этого.

Главным преимуществом нейрокомпьютеров является возможность осуществления массовых параллельных вычислений. Для этого базовые процессорные элементы обычно соединяют в вычислительные комплексы, при этом делается попытка вместить как можно больше элементов на одном чипе, а оставшиеся компоненты размещаются на мультипроцессорных платах.

Искусственный нос — инновационная технология, которая находит все большее применение в различных областях науки и промышленности. Эта технология может быть интегрирована в систему пожарной автоматики, о чем свидетельствуют публикации двух последних десятилетий [15–18]. Основная задача искусственного носа заключается в обнаружении и анализе различных химических соединений. Для эмуляции биологического носа необходимо учитывать несколько факторов.

Первый фактор — способность обнаруживать и анализировать различные компоненты газов. Биологический нос может обнаружить даже самые низкие концентрации веществ, в то время как технологии все еще имеют определенные ограничения.

Второй фактор — способность различать и идентифицировать запахи. Биологический нос способен распознавать множество различных запахов и идентифицировать их, в то время как технологии могут иметь трудности с этим.

Третий фактор — устойчивость к воздействию внешних факторов. Биологический нос обладает уникальной способностью адаптироваться к изменяющимся условиям, в то время как технологии могут быть более уязвимыми к таким факторам, как температура или влажность.

Чтобы эффективно имитировать биологический нос, необходимо постоянно улучшать и развивать технологии анализа газов, учитывая указанные ниже факторы. Только так можно достичь высокой точности и надежности измерений, приближенных к возможностям человеческого обоняния.

Для создания эффективных сенсоров используются различные материалы, их выбор является одним из ключевых аспектов в разработке искусственного носа. Важно использовать компоненты, обладающие определенной реакцией на анализируемые химические соединения, такие как полимеры, металлы и наночастицы. Измерения резонансной частоты позволяют искусственным носам определить харак-

теристики анализируемых химических соединений, такие как концентрация и тип вещества.

Для обработки получаемых сигналов часто используются нейросети, повышающие точность и скорость анализа.

Однако разные алгоритмы обработки данных дают различные результаты. Поэтому необходимо провести сравнительный анализ алгоритмов распознавания сигналов с использованием нейросетей и традиционных методов обработки данных, чтобы выбрать наиболее эффективный. Это важно для обеспечения надежности и точности системы анализа химических соединений.

Искусственный нос также должен быть интегрирован в систему и управляться ею. Для этого необходимы специальные программы и интерфейсы для контроля его работы и получения необходимой информации.

Для успешного использования искусственного носа важно провести тестирование разработанной системы и сравнить ее эффективность с эффективностью биологического носа. Это поможет оценить достоверность результатов и усовершенствовать работу искусственного носа, что особенно важно для задач с высокими требованиями к точности и надежности анализа.

Искусственный нос имеет широкий спектр применения и может быть использован в различных задачах, где требуется обнаружение и анализ химических соединений, не доступных для человеческого обоняния.

Это средство предлагают применять, чтобы отслеживать угрозы, связанные с горючими жидкостями в автобусах в частности, и своевременно выдавать предупреждения о безопасности [15]. Искусственные носы могут также за считанные минуты обнаруживать лесные пожары в течение первого часа их тления, что значительно увеличивает шансы на их тушение⁴. Изучен потенциал использования технологии для раннего обнаружения пожаров, возникающих в результате возгорания лесных товаров на складах и в других помещениях [16].

Система машинного зрения — это совокупность компонентов и процессов, предназначенных для обработки и анализа изображений. Она включает в себя источники изображений, которые могут быть камерами или другими устройствами, способными регистрировать визуальную информацию.

Машинное зрение по сравнению с традиционной системой пожарной сигнализации, основанной

⁴ Darshil Patel Electronic Noses Sniff Out Diseases, WildFires, and Pestered Plants April 21, 2023. URL: <https://www.allaboutcircuits.com/news/electronic-noses-sniff-out-diseases-wildfires-and-pestered-plants/> (дата обращения: 08.12.2023).

на пожарных извещателях, характеризуется большей эффективностью [19].

Для машинного зрения используются различные камеры и датчики. Например, видеокamеры позволяют получать изображения визуальной информации. Тепловизионные камеры используются для определения тепловых излучений, что может быть полезно при обнаружении пожаров. 3D-камеры позволяют получить трехмерное изображение, что важно для точного распознавания объектов.

Полученное изображение отправляется на обработку, где анализируются особые признаки с использованием алгоритмов обработки, таких как фильтры, сегментация и улучшение контрастности. Система извлекает особенности из обработанного изображения для определения объектов и их характеристик.

Машинное зрение использует модели глубокого обучения для классификации и распознавания объектов, предварительно обученных на больших наборах размеченных изображений [20, 21]. Модели обеспечивают высокую точность распознавания объектов.

После распознавания система интерпретирует данные и принимает решения в соответствии с предварительными установками или правилами. Интеграция с другими системами позволяет обмениваться данными для более точного анализа. Технология также обеспечивает хранение и управление данными для доступа к хронологической информации и ее использования при обработке новых изображений.

Типичными задачами, которые решаются с помощью систем машинного зрения, являются обнаружение и поиск объектов, измерение размеров, цветовой анализ. В системах безопасности машинное зрение позволяет распознавать лица, анализировать видеопотоки и обнаруживать аномалии^{5, 6}.

Однако существуют и некоторые трудности и ограничения в области машинного зрения. Например, сложность обработки и анализа больших объемов данных, необходимость высокой вычислительной мощности и ресурсов, а также проблемы с надежностью и безопасностью системы. Кроме того, машинное зрение также сталкивается с этическими и юридическими вопросами, связанными с приватностью данных и использованием в интеллектуальных системах. Это требует дальнейших исследований и разработок в этой области, а также внимательного внедрения и регулирования с точки зрения этики и безопасности.

⁵ Что такое машинное зрение 1.04.2015. URL: <https://www.vitec.ru/znaniya/articles/prakticheskie-voprosi-primeneniya-teh-zreniya/?ysclid=ln97tuzkkr886809939> (дата обращения: 09.12.2023).

⁶ Что такое машинное зрение? Amazon Web Service. URL: <https://aws.amazon.com/ru/what-is/computer-vision/> (дата обращения: 09.12.2023).

Микросенсорные кластеры — технология, способная решать сложные задачи и предоставлять ценную информацию в различных областях. Их можно использовать в таких технологиях, как искусственный нос или система машинного зрения. Основными компонентами микросенсорного кластера являются датчики, процессор, память, порты ввода-вывода и коммуникационные интерфейсы.

Микросенсорные кластеры имеют широкий спектр применений за счет их компактности, энергоэффективности и возможности работы в реальном времени, их можно встроить в различные устройства, начиная от смартфонов и домашних устройств умного дома до больших промышленных систем. Они могут использоваться для мониторинга энергопотребления в зданиях или производственных процессах, позволяя оптимизировать эффективность и экономить энергию, а также могут применяться для контроля качества воздуха в помещениях.

Выводы

Произведен обзор применения интеллектуальных пожарных извещателей в задачах обнаружения опасных факторов пожара. Например, предлагается интегрировать датчики температуры в интеллектуальную систему пожаротушения.

Рассмотрено преобразование сигналов с интеллектуальных пожарных извещателей, предложены условия безопасности на разных уровнях.

Для координации и синхронизации системы применяются контроллеры, нейрокомпьютеры в частности, позволяющие производить массовые параллельные вычисления.

Искусственный нос также может быть интегрирован в систему пожарной автоматики, о чем свидетельствуют публикации двух последних десятилетий. К особенностям такой технологии относят возможности обнаружения незначительных концентраций различных газов и запахов (в том числе недоступных биологическому носу) благодаря измерениям резонансной частоты и устойчивости к внешним воздействиям.

С помощью машинного зрения происходит извлечение особенностей из обрабатываемых изображений и дальнейшая их классификация и распознавание в моделях глубокого обучения. Для измерений характеристик теплового потока применяются тепловизионные камеры.

Микросенсорные кластеры позволяют контролировать качество воздуха и передавать соответствующие сведения в систему пожаротушения.

Таким образом, использование интеллектуальных пожарных извещателей значительно повышает эффективность и надежность системы пожарной безопасности. Они обеспечивают более раннее обнару-

ружение пожаров и позволяют быстро реагировать на них, что существенно снижает риск для жизни и имущества. Кроме того, такие извещатели упрощают управление и контроль над системой пожарной автоматики, делая ее более доступной и удобной для пользователей.

В исследовании были обозначены тренды интеллектуальных пожарных извещателей, а также решены

задачи по определению системы пожарной автоматики и места в ней извещателей, по выявлению основных направлений актуальных отечественных и зарубежных публикаций по вопросу применения искусственного интеллекта и интернета вещей в системе пожарной автоматики. Результаты работы будут полезны исследователям, разработчикам системы пожарной автоматики.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Гительман Л.Д., Кожевников М.В. Электрификация как драйвер развития «умных городов» // Экономика региона. 2017. Т. 13. Вып. 4. С. 1199–1210. DOI: 10.17059/2017-4-18
2. Корольченко Д.А., Корольченко А.Я. Основы пожарной безопасности предприятия. Полный курс пожарно-технического минимума : уч. пос., 3-е изд., перераб. и доп. М. : Пожнаука, 2011.
3. Ву Т.З. Автоматическое управление интеллектуальным зданием на основе датчиков // Перспективы развития информационных технологий. 2011. № 3–2. С. 57–60.
4. Lui Z., Kim A.K. Review of recent developments in fire detection technologies // Journal of Fire Protection Engineering. 2003. Vol. 13. Issue 2. Pp. 1–20. DOI: 10.1177/104239103033496
5. Дарбаков Д.В., Менкеев А.И., Членов А.Н. Современное состояние и перспективы развития аспирационных пожарных извещателей (АПИ) // Пожарная безопасность: проблемы и перспективы. 2018. Т. 1. № 9. С. 202–205.
6. Jiang L. Intelligent control of building fire protection system using digital twins and semantic web technologies // Automation in construction. 2023. Vol. 147. Issue 8. P. 104728. DOI: 10.1016/j.autcon.2022.104728
7. Hsu W.-L., Jhuang J.Y., Huang C.S., Liang C.K., Shiau Y.C. Application of internet of things in a kitchen fire prevention system // Applied Sciences. 2019. Vol. 3520. Vol. 9. Issue 17. Pp. 1–22. DOI: 10.3390/app9173520
8. Белозеров В.В. Методы, модели и средства автоматизации управления техносферной безопасностью : автореф. ... дис. д-ра техн. наук. Ростов н/Д, 2012. 46 с.
9. Периков А.В. Системный анализ и нанотехнологии безопасности в инженерных системах жилых высотных зданий // Нанотехнологии в строительстве. 2018. Т. 10. № 2. С. 114–130.
10. Андреев А.В., Доронин А.С., Терехин С.Н. Перспективы построения систем пожарной сигнализации на принципах искусственного интеллекта (на примере газовых пожарных извещателей) // Вестник Санкт-Петербургского университета Государственной противопожарной службы МЧС России. 2022. № 1. С. 65–74.
11. Maxkamov B., Muminova S.S., Sidiqov S.M. o'g'li. Ensuring fire safety during the implementation of the “smart house” concept // Science and innovation. 2022. No. 3. Pp. 338–345. DOI: 10.5281/zenodo.6819386
12. Huang X., Wu X., Usmani A. Perspectives of using artificial intelligence in building fire safety // Handbook of Cognitive and Autonomous Systems for Fire Resilient Infrastructures. Chapter 6 / Naser M., Corbett G. (eds.). Springer, 2022. Pp. 1–25. DOI: 10.1007/978-3-030-98685-8_6
13. Li H., Chen Z., Lu Y., Li P., Wang Q.A., Liu Z. et al. Research on intelligent monitoring of fire safety and fire rescue plan for tunnel operation under quasi-unattended background // Buildings. 2023. Vol. 13. Issue 8. P. 2110. DOI: 10.3390/buildings13082110
14. Martinsson J., Runefors M., Frantzich H., Glebe D., McNamee M., Mogren O. A novel method for smart fire detection using acoustic measurements and machine learning: proof of concept // Fire Technology. 2022. Vol. 58. Issue 6. Pp. 3385–3403. DOI: 10.1007/s10694-022-01307-1
15. Wu Z., Wang H., Wang X., Zheng H., Chen Z., Meng C. Development of electronic nose for qualitative and quantitative monitoring of volatile flammable liquids // Sensors. 2020. Vol. 20. Issue 7. P. 1817. Pp. 1–12. DOI: 10.3390/s20071817
16. Joseph P., Bakirtzis D., Vieille A. An “electronic nose” as a potential device for fire detection of forest product fire loads in enclosures // Wood Material Science and Engineering. 2014. Vol. 10. Issue 1. Pp. 130–144. DOI: 10.1080/17480272.2014.939713
17. Khorramifar A., Karami H., Lvova L., Kolouri A., Lazuka E., Pilat-Rožek M. et al. Environmental engineering applications of electronic nose systems based on MOX gas sensors // Sensors. 2023. Vol. 23. Issue 12. P. 5716. DOI: 10.3390/s23125716
18. Scorsone E., Pisanelli A.M., Persaud K. Development of an electronic nose for fire detection // Sensors and Actuators B Chemical. 2006. Vol. 116. Issue 1–2. Pp. 55–61. DOI: 10.1016/j.snb.2005.12.059
19. Станкевич Т.С., Мишук Б.Р. Интеллектуальный подход к детектированию дыма как опасного фактора пожара // Вестник молодежной науки. 2022. № 1 (33). С. 1–8. DOI: 10.46845/2541-82-54-2022-1(31)-11-11
20. Geetha S., Abhishek C.S., Akshayanat C.S. Machine vision based fire detection techniques: a survey // Fire Technology. 2021. Vol. 57. Issue 2. Pp. 591–623. DOI: 10.1007/s10694-020-01064-z

21. Mondal M.S., Prasad V., Kumar R., Saha N., Guha S., Ghosh R. et al. Automating fire detection and suppression with computer vision: a multi-layered filtering approach to enhanced fire safety and rapid response // *Fire Technology*. 2023. Vol. 59. Issue 4. Pp. 1555–1583. DOI: 10.1007/s10694-023-01392-w

REFERENCES

1. Gitelman L.D., Kozhevnikov M.V. Electrification as a driver of the development of “smart cities”. *The economy of the region*. 2017; 13(4):1199-1210. DOI: 10.17059/2017-4-18 (rus).
2. Korolchenko D.A., Korolchenko A.Ya. *Fundamentals of fire safety of an enterprise, a complete course of fire-technical minimum : textbook, 3rd ed., rev. and exp.* Moscow, Pozhnauka Publ., 2011. (rus).
3. Wu T.Z. Automatic control of an intelligent building based on sensors. *Prospects for the development of information technologies*. 2011; 3-2: 57-60. (rus).
4. Lui Z., Kim A.K. Review of recent developments in fire detection technologies. *Journal of Fire Protection Engineering*. 2003; 13(2):1-20. DOI: 10.1177/104239103033496
5. Darbakov D.V., Menkeev A.I., Members A.N. The current state and prospects of development of aspiration fire detectors (API). *Fire safety: problems and prospects*. 2018; 1(9):202-205. (rus).
6. Jiang L. Intelligent control of building fire protection system using digital twins and semantic web technologies. *Automation in construction*. 2023; 147(8):104728. DOI: 10.1016/j.autcon.2022.104728
7. Hsu W.-L., Jhuang J.Y., Huang C.S., Liang C.K., Shiau Y.C. Application of internet of things in a kitchen fire prevention system. *Applied Sciences*. 2019; 9(3520):1-22. DOI: 10.3390/app9173520
8. Belozеров V.V. *Methods, models and means of automation of technosphere safety management : abstract of the dissertation of the Doctor of Technical Sciences*. Rostov-on-Don, 2012; 46. (rus).
9. Perikov A.V. System analysis and nanotechnology of safety in engineering systems of residential high-rise buildings. *Nanotechnology in construction*. 2018; 10(2):114-130. (rus).
10. Andreev A.V., Doronin A.S., Terekhin S.N. Prospects for building fire alarm systems based on the principles of artificial intelligence (on the example of gas fire detectors). *Bulletin of the St. Petersburg University of the State Fire Service of the Ministry of Emergency Situations of Russia*. 2022; 1:65-74. (rus).
11. Maxkamov B., Muminova S.S., Sidiqov S.M. o'g'li. Ensuring fire safety during the implementation of the “smart house” concept. *Science and innovation*. 2022; 3:338-345. DOI: 10.5281/zenodo.6819386
12. Huang X., Wu X., Usmani A. Perspectives of using artificial intelligence in building fire safety. *Handbook of Cognitive and Autonomous Systems for Fire Resilient Infrastructures*. Chapter 6. Naser M., Corbett G. (eds.). Springer. 2022; 1-25. DOI: 10.1007/978-3-030-98685-8_6
13. Li H., Chen Z., Lu Y., Li P., Wang Q.A., Liu Z. et al. Research on intelligent monitoring of fire safety and fire rescue plan for tunnel operation under quasi-unattended background. *Buildings*. 2023; 13(8):2110. DOI: 10.3390/buildings13082110
14. Martinsson J., Runefors M., Frantzich H., Glebe D., McNamee M., Mogren O. A novel method for smart fire detection using acoustic measurements and machine learning: proof of concept. *Fire Technology*. 2022; 58(6):3385-3403. DOI: 10.1007/s10694-022-01307-1
15. Wu Z., Wang H., Wang X., Zheng H., Chen Z., Meng C. Development of electronic nose for qualitative and quantitative monitoring of volatile flammable liquids. *Sensors*. 2020; 20(7):1817. DOI: 10.3390/s20071817
16. Joseph P., Bakirtzis D., Vieille A. An “electronic nose” as a potential device for fire detection of forest product fire loads in enclosures. *Wood Material Science and Engineering*. 2014; 10(1):130-144. DOI: 10.1080/17480272.2014.939713
17. Khorramifar A., Karami H., Lvova L., Kolouri A., Łazuka E., Piłat-Rożek M. et al. Environmental engineering applications of electronic nose systems based on MOX gas sensors. *Sensors*. 2023; 23(12):5716. DOI: 10.3390/s23125716
18. Scorsone E., Pisanelli A.M., Persaud K. Development of an electronic nose for fire detection. *Sensors and Actuators B Chemical*. 2006; 116(1-2):55-61. DOI: 10.1016/j.snb.2005.12.059
19. Stankevich T.S., Mishchuk B.R. Intelligent approach to smoke detection as a dangerous fire factor. *Vestnik youth science*. 2022; 1(33):1-8. DOI: 10.46845/2541-82-54-2022-1(31)-11-11 (rus).
20. Geetha S., Abhishek C.S., Akshayanat C.S. Machine vision based fire detection techniques: a survey. *Fire Technology*. 2021; 57:591-623. DOI: 10.1007/s10694-020-01064-z
21. Mondal M.S., Prasad V., Kumar R., Saha N., Guha S., Ghosh R. et al. Automating fire detection and suppression with computer vision: a multi-layered filtering approach to enhanced fire safety and rapid response. *Fire Technology*. 2023; 59(4):1555-1583. DOI: 10.1007/s10694-023-01392-w

Поступила 13.12.2023, после доработки 15.01.2024;

принята к публикации 15.03.2024

Received December 13, 2023; Received in revised form January 15, 2024;

Accepted March 15, 2024

Информация об авторах

ЕРМАКОВ Станислав Александрович, старший преподаватель кафедры комплексной безопасности в строительстве, Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет, Россия, 129337, г. Москва, Ярославское шоссе, 26; РИНЦ ID: 638451; Scopus AuthorID: 56073793500; ORCID: 0000-0002-9158-8801; e-mail: ErmakovSA@mgsu.ru

ДИМИТРИЮК Владислав Васильевич, студент, Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет, Россия, 129337, г. Москва, Ярославское шоссе, 26; ORCID: 0009-0008-7868-0751; e-mail: ivmockve@mail.ru

ЖДАНОВ Сергей Михайлович, студент, Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет, Россия, 129337, г. Москва, Ярославское шоссе, 26; ORCID: 0009-0009-7644-8040; e-mail: zhsm060602@mail.ru

ФАДЕЕВ Александр Андреевич, студент, Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет, Россия, 129337, г. Москва, Ярославское шоссе, 26; ORCID: 0009-0009-0986-9312; e-mail: alexxx2002dans@gmail.com

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

Information about the authors

Stanislav A. ERMAKOV, Senior Lecturer of Integrated Safety in Civil Engineering, National Research Moscow State University of Civil Engineering, Yaroslavskoe shosse, 26, Moscow, 129337, Russian Federation; ID RISC: 638451; Scopus AuthorID: 56073793500; ORCID: 0000000291588801; e-mail: ErmakovSA@mgsu.ru

Vladislav V. DIMITRYUK, student, National Research Moscow State University of Civil Engineering, Yaroslavskoe shosse, 26, Moscow, 129337, Russian Federation; ORCID: 0009-0008-7868-0751; e-mail: ivmockve@mail.ru

Sergey M. ZHDANOV, student, National Research Moscow State University of Civil Engineering, Yaroslavskoe shosse, 26, Moscow, 129337, Russian Federation; ORCID: 0009-0009-7644-8040; e-mail: zhsm060602@mail.ru

Aleksandr A. FADEEV, student, National Research Moscow State University of Civil Engineering, Yaroslavskoe shosse, 26, Moscow, 129337, Russian Federation; ORCID: 0009-0009-0986-9312; e-mail: alexxx2002dans@gmail.com

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

ПОЖАРОВЗРЫВБЕЗОПАСНОСТЬ/FIRE AND EXPLOSION SAFETY. 2024. Т. 33. № 2. С. 77–90
POZHAROVZRYVBEZOPASNOST/FIRE AND EXPLOSION SAFETY. 2024; 33(2):77-90

НАУЧНАЯ СТАТЬЯ/RESEARCH PAPER

УДК 614.86

<https://doi.org/10.22227/0869-7493.2024.33.02.77-90>

Организация управления пожарными подразделениями с использованием современного пожарно-спасательного оборудования при тушении пожаров воздушных судов

Виталий Вячеславович Крымский ✉, Владислав Романович Головенко

Санкт-Петербургский университет Государственной противопожарной службы Министерства Российской Федерации по делам гражданской обороны, чрезвычайным ситуациям и ликвидации последствий стихийных бедствий им. Героя Российской Федерации генерала армии Е.Н. Зиничева, г. Санкт-Петербург, Россия

АННОТАЦИЯ

Введение. Рассмотрены тактические аспекты управления боевыми действиями по тушению пожаров воздушных судов при возникновении возгорания внутри фюзеляжа. Предложена авторская тактика тушения внутрифюзеляжных пожаров воздушного судна с использованием современного оборудования, стоящего на вооружении в подразделениях Государственной противопожарной службы.

Цель и задачи. Оптимизация и усовершенствование управленческих решений по ликвидации чрезвычайных ситуаций аварий воздушных судов, а также усовершенствование комплектования и оснащения пожарно-спасательных подразделений.

Материалы и методы. В процессе работы рассмотрена применяемая в наши дни тактика тушения подобных пожаров аварийно-спасательными подразделениями, а также проведены пожарно-тактические учения по тушению воздушного судна на территории международного аэропорта. Произведено два расчета ведения боевых действий по тушению пожаров с применением имеющихся сил и средств аварийно-спасательных подразделений: расчет по реально применяемой тактике тушения и расчет тактики тушения, предложенной авторами статьи после апробации ее в ходе учений. В заключении произведен сравнительный анализ полученных из расчетов данных.

Результаты и их обсуждение. В результате исследования была предложена авторская тактика, базирующаяся на применении современной технологии, предназначенной для быстрого тушения пожаров, а именно — установки пожаротушения с гидроабразивной резкой «Кобра». На основании произведенных расчетов, сравнительного анализа и полученных выводов авторы статьи рекомендуют к доукомплектованию подразделений служб поискового и аварийно-спасательного обеспечения полетов нашей страны установками пожаротушения с гидроабразивной резкой «Кобра», которые в данный момент отсутствуют в распоряжении этих служб.

Выводы. В результате исследования был получен обоснованный вывод об эффективности и необходимости внедрения новой тактики тушения пожаров и доукомплектования служб поискового и аварийно-спасательного обеспечения полетов нашей страны установками пожаротушения с гидроабразивной резкой «Кобра». Также в условиях отсутствия графического отображения установки пожаротушения с гидроабразивной резкой «Кобра» в нормативных документах системы МЧС России авторами статьи было разработано и предложено применять в документах предварительного планирования графическое отображение установки пожаротушения с гидроабразивной резкой «Кобра» и внести изменения в нормативную базу МЧС России в виде графического отображения этой установки, так как в настоящее время оно отсутствует.

Ключевые слова: ликвидация чрезвычайной ситуации; летательный аппарат; тактика тушения пожара; фюзеляж самолета; управление боевыми действиями; авиационное происшествие

Благодарности. Авторы статьи выражают благодарность начальнику аварийно-спасательного формирования ООО «Воздушные Ворота Северной Столицы» Тимуре Андреевичу Казакову-Прокопьеву и заместителю начальника Главного управления МЧС России г. Санкт-Петербурга генерал-майору внутренней службы Игорю Валерьевичу Титенку за большую помощь в организации опытных пожарно-тактических учений по тушению воздушного судна с использованием современного пожарно-спасательного оборудования, стоящего на вооружении в гарнизоне г. Санкт-Петербурга.

Для цитирования: Крымский В.В., Головенко В.Р. Организация управления пожарными подразделениями с использованием современного пожарно-спасательного оборудования при тушении пожаров воздушных судов // Пожаровзрывобезопасность/Fire and Explosion Safety. 2024. Т. 33. № 2. С. 77–90. DOI: 10.22227/0869-7493.2024.33.02.77-90

✉ Крымский Виталий Вячеславович, e-mail: kvv-1982@yandex.ru

Organization of management of firefighting units with the use of modern fire and rescue equipment when extinguishing aircraft fires

Vitaly V. Krymsky , Vladislav R. Golovenko

Saint-Petersburg University of State Fire Service of the Ministry of the Russian Federation for Civil Defense, Emergencies and Elimination on Consequences of Natural Disasters named after Hero of the Russian Federation, Army General E.N. Zinichev, Saint Petersburg, Russian Federation

ABSTRACT

Introduction. Tactical aspects of combat action management for aircraft fire extinguishing in case of fire inside the fuselage are considered. The author's tactics of aircraft fuselage fires extinguishing using modern equipment in service with the State Fire Service units are proposed.

Goal and objectives. Optimization and improvement of management solutions for the elimination of emergency situations of aircraft accidents, as well as improvement of staffing and equipping of fire and rescue units.

Materials and methods. In the process of work the tactics used today to extinguish such fires by emergency rescue units were considered, as well as fire-tactical exercises to extinguish an aircraft on the territory of an international airport were carried out. Two calculations of combat operations on extinguishing fires with the use of available forces and means of rescue units were made: the calculation of the actually used extinguishing tactics and the calculation of the extinguishing tactics proposed by the authors of the paper after approbation of it during the exercises. In conclusion, a comparative analysis of the data obtained from the calculations is made.

Results and their discussion. As a result of the research, the author's tactics were proposed, based on the application of modern technology designed for rapid fire extinguishing, namely, fire extinguishing installations with waterjet cutting "Cobra". Based on the calculations made, comparative analysis and conclusions obtained, the authors of the paper recommend supplementing the units of search and rescuing services of our country's flights with fire extinguishing installations with waterjet cutting "Cobra", which are currently not available to these services.

Conclusions. As a result of the research a reasonable conclusion about the effectiveness and necessity of implementation of new tactics of fire extinguishing and additional staffing of the services of search and rescue support of our country's flights with fire extinguishing units with waterjet cutting "Cobra" was obtained. Also, in the absence of graphical representation of the fire extinguishing installation with waterjet cutting "Cobra" in the regulatory documents of the EMERCOM of Russia, the authors of the paper developed and proposed to use in the pre-planning documents a graphical representation of the fire extinguishing installation with waterjet cutting "Cobra", and to make changes in normative base of the EMERCOM of Russia in the form of graphical representation of this installation, as at present it is absent.

Keywords: emergency situation elimination; aircraft; fire extinguishing tactics; aircraft fuselage; combat operations management; aviation accident

Acknowledgments. The authors of the paper would like to express their gratitude to Timur Andreevich Kazakov-Prokopyev, the head of the emergency rescue formation of the Northern Capital Air Gate LLC, and Igor Valeryevich Titenok, the deputy head of the Main Department of the Ministry of Emergency Situations of Russia in St. Petersburg, Major General of the Internal Service, for his great help in organizing experienced fire-tactical exercises to extinguish an aircraft using modern firefighting and rescue equipment in service in the garrison of St. Petersburg.

For citation: Krymsky V.V., Golovenko V.R. Organization of management of firefighting units with the use of modern fire and rescue equipment when extinguishing aircraft fires. *Pozharovzryvobezopasnost/Fire and Explosion Safety*. 2024; 33(2):77-90. DOI: 10.22227/0869-7493.2024.33.02.77-90 (rus).

 Vitaly Vyacheslavovich Krymsky, e-mail: kvv-1982@yandex.ru

Введение

С точки зрения управления боевыми действиями по тушению пожаров (далее — ТП), для руководителя тушения пожара (далее — РТП) — пожары воздушных судов (далее — ВС) являются самыми быстротечными по времени и одними из самых сложных и непредсказуемых.

В условиях поставленной научной задачи оптимизации и совершенствования управленческих решений по ликвидации чрезвычайных ситуаций аварий воздушных судов, а также усовершенствования комплектования и оснащения пожарно-спасательных под-

разделений рассмотрим основные аспекты по данному вопросу.

В зависимости от места возникновения и характеристик горючей нагрузки на ВС различают следующие виды пожаров:

- пожар разлива авиатоплива под ВС (возможен при аварийном приземлении или заправке ВС авиационным топливом) [1];
- пожар внутри фюзеляжа (рис. 1) (далее — ПВФ) ВС;
- пожар тормозных систем ВС (возможен при экстренном торможении ВС) [2, 3];
- пожар двигателя(ей) ВС (возможен по многим причинам, таким, например, как неисправность



Рис. 1. Вид пассажирского салона внутри фюзеляжа ВС (URL: <https://dzen.ru/a/XxrjQZ-MoEphIOyg>)

Fig. 1. View of passenger cabin inside the aircraft fuselage (URL: <https://dzen.ru/a/XxrjQZ-MoEphIOyg>)

самой силовой установки или попадание в работающий двигатель посторонних предметов) [4].

Из всех перечисленных видов пожаров ВС рассмотрим ПВФ ВС. ПВФ относятся к пожарам в замкнутом объеме. Особенно опасны и непредсказуемы из всех возможных мест в ВС (кабина пилотов, зона разогрева пищи, багажный отсек) пожары в пассажирских салонах из-за паники пассажиров, нехватки свободного места для быстрой подачи огнетушащих веществ (далее — ОВ), высокой пожарной нагрузки, а также выделяющихся ядовитых токсичных веществ из декоративно-отделочных и конструкционных элементов интерьера ВС [5] (искусственные и натуральные материалы наполнения и обивки пассажирских кресел, внутренняя обшивка, напольные материалы).

Для ПВФ характерны:

- высокая задымленность ВС (рис. 2);
- быстрое нарастание температуры t° в верхней части салона ВС и медленное — в зоне пола;
- небольшие размеры самого пожара.

На начальной стадии в момент перехода возгорания в ПВФ среднее значение t° в зоне пожара в 2–4 раза превышает t° в зоне пола. Среднеобъемная t° до момента прогорания обшивки не превышает 250°C . ПВФ имеет тлеющий характер без видимого



Рис. 2. Пример задымления ПВФ (URL: amolety/630-pozhar-v-salone-samoleta-43-foto.html)

Fig. 2. Example of smoke from a fire inside the fuselage (URL: amolety/630-pozhar-v-salone-samoleta-43-foto.html)

пламени, однако он не прекращается до полного выгорания горючей загрузки [6]. Горение происходит по поверхности пассажирских кресел, стен, потолков с дальнейшим распространением на весь объем салона из-за капель от расплавленных синтетических материалов декоративно-отделочных и конструкционных элементов интерьера ВС.

При прогорании обшивки ПВФ усиливается до появления открытого пламени и t° в верхней части салона возрастает (до 900°C). Высокая t° может привести к загоранию и расплавлению сплавов магния, входящих в конструкцию некоторых типов пассажирских кресел, что повлечет за собой дополнительные трудности при тушении [7].

Такие пожары не редкость, рассмотрим подобные чрезвычайные ситуации (ЧС) за последние годы.

1. 25.12.2022 г. США, Нью-Йорк, самолет Airbus A320 авиакомпании JetBlue (США). Во время приготовления к высадке пассажиров у одного из них взорвалась батарея ноутбука. На борту было 127 пассажиров, 7 человек получили травмы.

2. 29.12.2022 г. Россия, Москва, аэропорт Домодево, самолет авиакомпании «Уральские авиалинии» (Россия), рейс Москва – Калининград. Во время подготовки ВС к взлету у одного из пассажиров загорелся внешний аккумулятор. Всех пассажиров эвакуировали, пострадавших нет.

3. 10.01.2023 г. пожар на борту самолета Airbus A320 авиакомпании Scoot Airlines (Сингапур), рейс Тайвань – Сингапур. Причина — возгорание перегревшегося внешнего аккумулятора одного из пассажиров. На борту было 200 пассажиров. Произошло задымление салона. Два пассажира получили ожоги рук, ВС было вынуждено вернуться обратно в Тайвань.

4. 07.02.2023 г. Сан-Диего, самолет Boeing 737 авиакомпании United Airlines (США), рейс Сан-Диего – Ньюарк. Причина — пожар аккумулятора ноутбука в салоне ВС. Самолет был вынужден вернуться в аэропорт отправления. Пострадали 4 человека.

5. 09.05.2023 г. пожар на борту Airbus A321 авиакомпании Scoot Airlines (Сингапур), рейс Бангкок – Сингапур. На борту самолета находилось 230 пассажиров и восемь членов экипажа. Произошло сильное задымление пассажирского салона. ВС было вынуждено вернуться в Бангкок. Пострадавших нет.

Тушение ПВФ определяется следующими факторами:

- наличием или отсутствием пассажиров внутри ВС;
- местом расположения очага пожара.

Наиболее сложно тушить ПВФ при наличии людей. При таком пожаре необходимо одновременно обеспечить быстрое вскрытие всех выходов ВС, вскрытие конструкции фюзеляжа с целью обес-



Рис. 3. СПАСОП аэропорта Пулково (г. Санкт-Петербург) (URL: <https://pulkovo-led.livejournal.com/64176.html>)

Fig. 3. Search, rescue and firefighting support service of Pulkovo Airport (St. Petersburg) (URL: <https://pulkovo-led.livejournal.com/64176.html>)

печения максимально возможной скорости эвакуации пассажиров [8]. Первоочередными задачами тушения ПВФ являются снижение t° и плотности задымления в ВС, быстрая локализация пожара. Для этого ОВ направляются таким образом, чтобы они защищали людей, охлаждали горящую поверхность. Эффективность тушения определяется правильным выбором ОВ и средством их подачи.

Стоит отметить, что тушением пожаров (далее — ТП) ВС занимаются подразделения службы поискового и аварийно-спасательного обеспечения полетов (далее — СПАСОП) (рис. 3). Данные подразделения не относятся к Министерству Российской Федерации по делам гражданской обороны, чрезвычайным ситуациям и ликвидации последствий стихийных бедствий (далее — МЧС России), а являются структурными подразделениями операторов аэропортов. Однако СПАСОП как специализированное поисковое и аварийно-спасательное подразделение является частью Единой государственной системы предупреждения и ликвидации чрезвычайных ситуаций (далее — РСЧС).

При ПВФ ВС на РТП возлагается ответственность по принятию правильных решений в ограниченный интервал времени, так как под угрозой будет находиться жизнь пассажиров и летного экипажа.

РТП необходимо действия личного состава подразделения выстроить следующим образом:

- проникновение личного состава внутрь ВС;
- спасение людей, не успевших эвакуироваться;
- прокладка рукавных линий;
- подача пожарных стволов внутрь фюзеляжа ВС;
- ТП.

Материалы и методы

Смоделируем пожар, аналогичный произошедшему в г. Москве 29.12.2022 г., но допустим, что он может произойти в реальных условиях, если

пожар перешел на внутреннюю обшивку пассажирского салона ВС, и рассмотрим тактику ТП.

В процессе подготовки к взлету ВС от возгорания в ручной клади одного из пассажиров произошло возгорание в хвостовой части пассажирского самолета Sukhoi Superjet 100 (рис. 4).

Данное ВС рассчитано на 87 пассажирских мест (модификация Sukhoi Superjet 100-95В) и обладает следующей компоновкой кресел на 20 рядов, учитывая бизнес-класс (рис. 5).

Произведем необходимые расчеты и рассмотрим тактику ТП данного ВС:

1. Определяем время свободного развития ПВФ ВС:

$$t_{\text{св}} = t_{\text{с}} + t_{\text{сб}} + t_{\text{сл}} + t_{\text{б.р}};$$

$$t_{\text{св}} = 3 + 1 + 3 + 3 = 8 \text{ мин},$$

где $t_{\text{с}}$ — время до обнаружения и сообщения о пожаре, мин;

$t_{\text{сб}}$ — время сбора и выезда подразделений СПАСОП, мин;

$t_{\text{сл}}$ — время следования подразделений к аварийному ВС, мин;

$t_{\text{б.р}}$ — время боевого развертывания первого прибывшего подразделения СПАСОП, мин.

Учитывая практическое время эвакуации людей из ВС, которое составляет 2 мин, принимаем то, что первые прибывшие подразделения СПАСОП не будут участвовать в эвакуации людей, а только в последующем спасении тех, кто не смог самостоятельно эвакуироваться.

2. Определяем расстояние, пройденное ПВФ ВС за время свободного развития:

$$L = 0,5 \cdot V_{\text{лин}} \cdot 10 + V_{\text{лин}} (t_{\text{св}} - 10);$$



Рис. 4. Sukhoi Superjet 100 (URL: sj-100/)

Fig. 4. Sukhoi Superjet 100 (URL: sj-100/)



Рис. 5. Компоновка салона Sukhoi Superjet 100 (URL: amolet/sukhoi-superjet-100)

Fig. 5. Sukhoi Superjet 100 cabin layout (URL: amolet/sukhoi-superjet-100)

$$L = 0,5 \cdot 2,5 \cdot 10 + 2,5 \cdot (10 - 10) = 12,5 \text{ м},$$

где $V_{\text{лин}}$ — линейная скорость распространения пожара, м/мин.

3. Определяем площадь пожара на момент прибытия первого подразделения СПАСОП, достигнув продольных стен пассажирского салона ВС, пожар примет прямоугольную форму.

Ширина пассажирского салона Sukhoi Superjet 100 (А) = 3,24 м:

$$S_{\text{пож}} = A \cdot L;$$

$$S_{\text{пож}} = 3,24 \cdot 12,5 = 40,5 \text{ м}^2.$$

4. Определяем площадь ТП:

$$S_{\text{туш}} = n \cdot A \cdot h_{\text{т}};$$

$$S_{\text{туш}} = 1 \cdot 3,24 \cdot 5 = 16,2 \text{ м}^2,$$

где n — количество направлений, с которых подаются пожарные стволы;

$h_{\text{т}}$ — глубина тушения ручным пожарным стволом, м.

5. Определяем требуемый расход огнетушащих средств:

$$Q_{\text{туш}}^{\text{тр}} = S_{\text{туш}} \cdot I_{\text{тр}};$$

$$Q_{\text{туш}}^{\text{тр}} = 16,2 \cdot 0,15 = 2,43 \text{ л/с},$$

где $I_{\text{тр}}$ — требуемая интенсивность подачи воды.

6. Определяем количество стволов на ТП:

$$N_{\text{ст}}^{\text{туш}} = \frac{Q_{\text{тр}}^{\text{тр}}}{q_{\text{ст}}^{\text{б}}};$$

$$N_{\text{ст}}^{\text{туш}} = \frac{2,43}{3,7} = 0,66 \Rightarrow$$

$\Rightarrow$ для тушения необходим 1 ствол РСК-50,

где $q_{\text{ст}}^{\text{б}}$ — расход воды из ствола РСК-50, л/с.

Таким образом, для ТП ПВФ ВС принимаем 1 ствол РСК-50 с расходом $Q_{\text{туш}}^{\text{тр}} = 3,7 \text{ л/с}$.

7. Определим количество стволов на охлаждение фюзеляжа ВС.

Исходя из боевой обстановки на пожаре ВС и тактических условий, на защиту следует предусмотреть перекрывные стволы с распыленной водой РСК-50 в количестве 2 шт. на охлаждение в хвостовой части самолета, а также 2 ствола РСК-50 для охлаждения крыла и шасси ВС (в крыле содержатся баки авиационного топлива, которые необходимо охлаждать, а содержащаяся в устройстве шасси гидравлическая тормозная система находится под давлением и при перегреве может взорваться):

$$N_{\text{ст}}^{\text{охл}} = 4;$$

$$Q_{\text{охл}}^{\text{тр}} = q_{\text{ст}}^{\text{б}} N_{\text{ст}}^{\text{охл}};$$

$$Q_{\text{охл}}^{\text{тр}} = 3,7 \cdot 4 = 14,8 \text{ л/с}.$$

8. Определим общий требуемый расход воды на ТП и охлаждение фюзеляжа ВС:

$$Q_{\text{общ}}^{\text{тр}} = Q_{\text{туш}}^{\text{тр}} + Q_{\text{охл}}^{\text{тр}};$$

$$Q_{\text{общ}}^{\text{тр}} = 3,7 + 14,8 = 18,5 \text{ л/с}.$$

9. Определим общее количество стволов для локализации пожара:

$$N_{\text{ст}}^{\text{общ}} = N_{\text{ст}}^{\text{туш}} + N_{\text{ст}}^{\text{охл}};$$

$$N_{\text{ст}}^{\text{общ}} = 1 + 4 = 5 \text{ ств. РСК-50}.$$

10. Определим количество л/с:

- работа с 1 стволом РСК-50 на ТП в составе звена газодымозащитной службы (ГДЗС) — 3 человека;
- работа с 4 стволами РСК-50 на защиту — 4 человека;
- РТП — 1 человек;
- для организации бесперебойной подачи воды и транспортировки пострадавших — 7 человек. Всего потребуется $N_{\text{л/с}} = 15$ человек.

11. Определим общее количество отделений для локализации пожара:

$$N_{\text{отд}} = \frac{N_{\text{л/с}}}{n};$$

$$N_{\text{отд}} = \frac{15}{4} = 3,75 \Rightarrow 4 \text{ отделения},$$

где n — количество человек в одном отделении СПАСОП.

Расстановку пожарной техники и распределение личного состава необходимо производить по следующей схеме (рис. 6).

Время развертывания пожарно-спасательного расчета в конце каждой взлетно-посадочной полосы (далее — ВПП) аэропорта не должно превышать 3 мин. Время развертывания определяется экспериментально при оптимальных условиях видимости и состояния дорожного покрытия [9].

Результаты выполнения аварийно-спасательных работ (далее — АСР) и ТП во многом зависят от грамотного руководства, наличия опыта и хладнокровности РТП [10]. Все действия подразделений должны быть качественно скоординированы. Большую роль в этом деле играет радиосвязь.

Важно отметить, что представленная выше тактика ТП ВС является стандартной, однако в процессе написания диссертации на тему «Методика управления боевыми действиями пожарных подразделений при тушении воздушных судов на основе повышения их тактических возможностей» были проведены

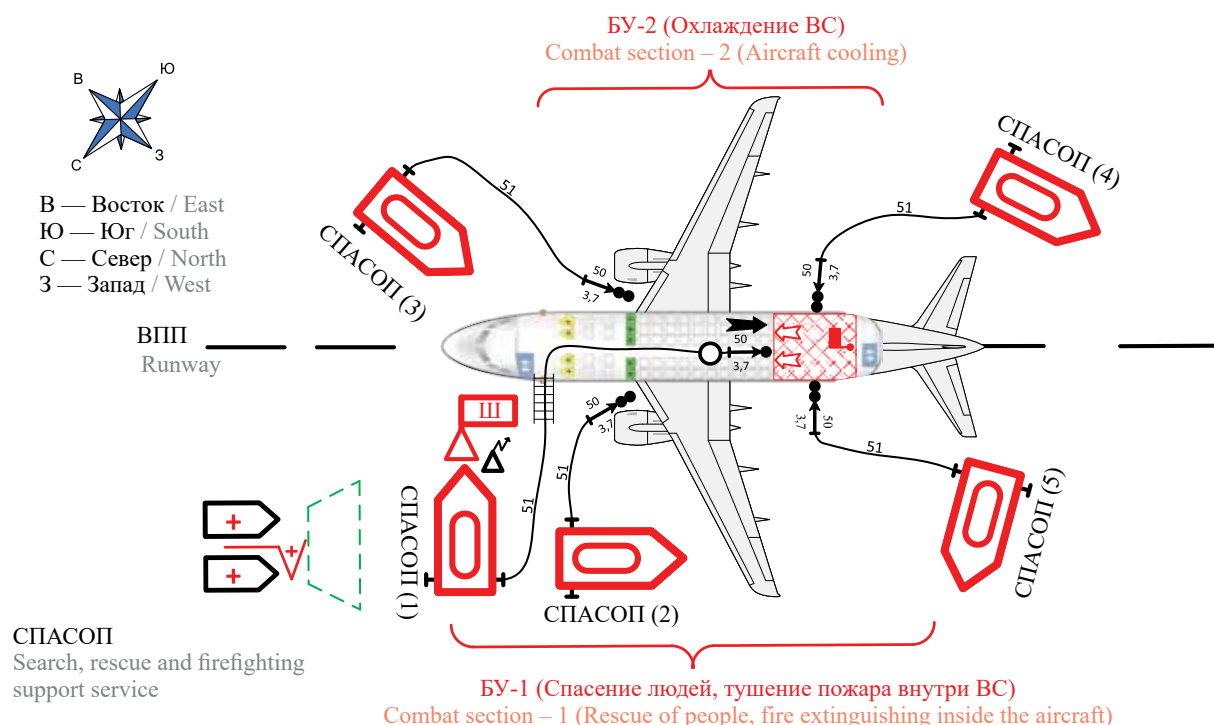


Рис. 6. Расстановка сил и средств при тушении ПВФ самолета Sukhoi Superjet 100 (авторский рисунок)

Fig. 6. Arrangement of forces and means during fire extinguishing inside the fuselage of Sukhoi Superjet 100 aircraft (author's drawing)

совместные опытные пожарно-тактические учения подразделениями СПАСОП аэропорта ООО «Воздушные Ворота Северной Столицы» (аэропорт Пулково, г. Санкт-Петербург) и гарнизоном г. Санкт-Петербурга, в ходе которых была оценена эффективность ТП ВС, произошедших внутри фюзеляжа, с применением установки пожаротушения с гидроабразивной резкой «Кобра» (рис. 7) (далее — КОБРА), которой обеспечены подразделения г. Санкт-Петербурга, но, к сожалению, она пока отсутствует в СПАСОП.

Рассмотрим подробнее принцип действия и тактико-технические характеристики (далее — ТТХ) (рис. 8 и таблица) КОБРЫ.

КОБРА через узкое сопло способна подавать воду, смешанную с абразивом (мелкой металлической стружкой) под давлением в 300 атм. Тем самым КОБРА способна «прогрызать» такие препятствия на пути к ТП, как металл, бетонные стены и т.д. Также КОБРА способна подавать пену.

Благодаря узкому соплу КОБРЫ и тому факту, что вода проникает к очагу пожара сквозь отверстие в преграде, она оказывается в тонкораспыленном состоянии, благодаря чему резко снижает внутреннюю температуру и осаждает задымленность.

На стволе установки находятся 2 спусковых крючка, один из которых отвечает за подачу воды, а другой за подачу абразива, таким образом, как только ствольщик, работающий с установкой, понимает, что преграда «прогрызена», он переходит

в режим тушения внутреннего пожара, отпуская спусковой крючок подачи абразива.

Применение КОБРЫ целесообразно также потому, что участникам ТП не нужно входить в непригодную для дыхания среду (далее — НДС), другими словами, проникать внутрь задымленного фюзеляжа ВС, особенно при проведении эвакуации [11–13]. Таким образом, будет сэкономлено время на включение личного состава в средства индивидуальной защиты органов дыхания (далее — СИЗОД). Также в условиях применения КОБРЫ участники ТП будут находиться в безопасности от воздействия на них опасных факторов пожара (далее — ОФП).

Цель проведенных опытных пожарно-тактических учений — необходимость оценить, насколько эффективно и безопасно применение КОБРЫ в ситуа-



Рис. 7. Установка пожаротушения КОБРА (авторское фото)
Fig. 7. Fire extinguishing unit KOBRA (author's photo)



Рис. 8. ТТХ КОБРЫ (URL: taty-polzovateley/ustanovkoy-pozharotusheniya-s-gidroabrazivnoy-rezkoy-kobra-tth/)

Fig. 8. Tactical and technical characteristics of the COBRA (URL: taty-polzovateley/ustanovkoy-pozharotusheniya-s-gidroabrazivnoy-rezkoy-kobra-tth/)

циях ПВФ ВС. Эмпирическим способом определить время, за которое подразделение может произвести боевое развертывание для применения КОБРЫ, а также установить, за какое время КОБРА может прорезать фюзеляж ВС, состоящий из авиационного алюминия, применяемого в наши дни (марка В95), а также утеплителя и внутренней обшивки пассажирского салона, оценить возможность подачи ОТВ через иллюминатор ВС, так как при крушении ВС экипаж обязан поднимать шторы иллюминатора, а это способствует быстрой оценке СПАСОП мест очага пожара, наличия пассажиров.

При проведении натурных испытаний было зафиксировано, что установка КОБРА на «отлично» справилась с поставленными задачами, так как:

- время развертывания от момента полной остановки пожарного автомобиля до момента приведения КОБРЫ в боевую готовность — 3 мин;
- время «прогрызания» ВС для подачи ОТВ внутрь — 10 с, причем КОБРА пробивает стенку фюзеляжа насквозь, несмотря на то что она состоит из нескольких слоев (рис. 9).

Важно понимать, что КОБРА не должна быть применена к ТП ВС в тех местах, где ею может быть нанесен ущерб здоровью людей, поэтому установку можно применить к ТП в багажном отсеке, либо к тушению пассажирского салона, но только в том случае, если люди будут своевременно эвакуированы, либо в очаговой зоне они отсутствуют.

В ситуации ПВФ ВС, находящегося на взлетно-посадочной полосе (далее — ВПП) аэропорта, можно рассчитывать на то, что эвакуация пассажиров произойдет достаточно оперативно: к ней незамедлительно приступает персонал ВС (стюардессы и пилоты) при первом же сообщении (как только заметят) об открытом огне или задымлении в салоне [14]. Эвакуацию производят с помощью надувных трапов ВС, время разворачивания которых в наши дни составляет всего 3 с.

Рассмотрим тактические варианты применения установки КОБРА.

КОБРА может быть применена как с уровня ВПП, если происходит тушение багажных отсеков (рис. 10), так и с крыла ВС в ситуации возгорания внутри пассажирского салона (рис. 11).

ТТХ КОБРЫ

Tactical and technical characteristics of the COBRA

Параметр Parameter	Значение Meaning	
Рабочее давление, атм Working pressure, atm	280–300	
Расход воды, л/мин Water consumption, l/min	56–60	
Расход пенообразователя, л/мин Foaming agent consumption, l/min	4	
Расход абразива, кг/мин (при резке) Abrasive consumption, kg/min (when cutting)	4,2	
Объем емкости для абразива, л (опционально) Volume of the abrasive tank, l (optional)	10 (20)	
Объем емкости для пенообразователя, л (опционально) Volume of the foaming agent tank, l (optional)	10 (23)	
Длина рукава катушки, м Length of the coil sleeve, m	80	
Ствол-резак Barrel-cutter		
Диаметр сопла, мм Nozzle diameter, mm	2,3	1,6
Габариты: длина × ширина × высота, мм (опционально) Dimensions: length × width × height, mm (optional)	1320 × 100 × 420 (900 × 100 × 420)	
Вес, кг Weight, kg	5,6 (5)	
Скорость резки Cutting speed		
2 мм сталь 2 mm steel	34	
12 мм сталь 12 mm steel	5	
Время проникновения, с Penetration time, s		
3 мм сталь 3 mm steel	5–10	
10 мм сталь 10 mm steel	30–40	
200 мм бетон 200 mm concrete	100	
Скорость подачи воды на выходе из ствола резака, м/с Water supply rate at the outlet of the barrel cutter, m/s	200	
Эффективная дальность струи, м Effective jet range, m	7	
Максимальная дальность струи, м Maximum jet range, m	15	



Рис. 9. Пробитие КОБРОЙ фюзеляжа ВС (авторское фото)
Fig. 9. COBRA penetration of an aircraft fuselage (author's photo)



Рис. 10. Использование КОБРЫ с уровня ВПП к багажному отсеку ВС (авторское фото)
Fig. 10. Use of COBRA from the runway level to the aircraft baggage compartment (author's photo)



Рис. 11. Использование КОБРЫ с крыла ВС (авторское фото)
Fig. 11. Using COBRA from an aircraft wing (author's photo)

Если же возгорание произошло таким образом, что необходимо подать КОБРУ на ТП пассажирского салона, но нет возможности это сделать с крыла ВС, например, пожар произошел в хвостовой части, а конфигурация самого самолета такова, что крыло находится в середине фюзеляжа, как, например, у Sukhoi Superjet 100, то СПАСОП может быть использован специальный автотрап аэропорта (рис. 12).

Результаты данного эксперимента демонстрируют высокие показатели КОБРЫ в ситуации тушения ВС с ПВФ. Также впервые был приобретен опыт эксплуатации КОБРЫ на ВС, что было по достоинству оценено СПАСОП аэропорта Пулково. В связи



Рис. 12. Автотрап на вооружении СПАСОП в аэропорту Пулково (авторское фото)

Fig. 12. Auto ladder in service with search, rescue and firefighting support at Pulkovo Airport (author's photo)

с этим можно рекомендовать КОБРУ к укомплектованию подразделений СПАСОП в аэропортах всей Российской Федерации, особенно при закупке новых пожарных автомобилей комбинированного тушения.

На основе доказанной натурным экспериментом эффективности КОБРЫ проведем расчет, который с математической точки зрения опишет процесс ТП ВС.

За основу расчета возьмем идентичную вышеизложенному расчету ситуацию ПВФ ВС в его хвостовой части (рис. 13). Для успешного ТП необходимо подать 2 ствола КОБРЫ на ТП, с помощью одного будет полностью остановлено распространение пламени, а также образована водяная завеса, которая защитит людей (которые потенциально еще могут остаться в салоне) от воздействия ОФП. Вторым стволом КОБРЫ будет организовано ТП. Так же, как и в предыдущем случае, необходимо подать 2 ствола РСК-50 для охлаждения крыла и шасси ВС, но, в отличие от предыдущего случая, всего 1 ствол РСК-50 на охлаждение хвостовой части фюзеляжа, так как поданные внутрь фюзеляжа 2 ствола КОБРЫ смогут очень быстро снизить t° пожара внутри пассажирского салона.

Важно отметить, что при такой тактике ТП ВС необходимость проникновения внутрь фюзеляжа для участников ТП будет нужна только в том случае, если не все пассажиры успеют самостоятельно эвакуироваться, и понадобится организовать спасение [15–18].

На основе данной боевой задачи и имеющихся сил и средств (СиС) произведем необходимые расчеты:

1. Определяем время свободного развития ПВФ ВС:

$$t_{\text{св}} = t_{\text{с}} + t_{\text{сб}} + t_{\text{сл}} + t_{\text{б.р.}};$$

$$t_{\text{св}} = 3 + 1 + 3 + 3 = 8 \text{ мин},$$

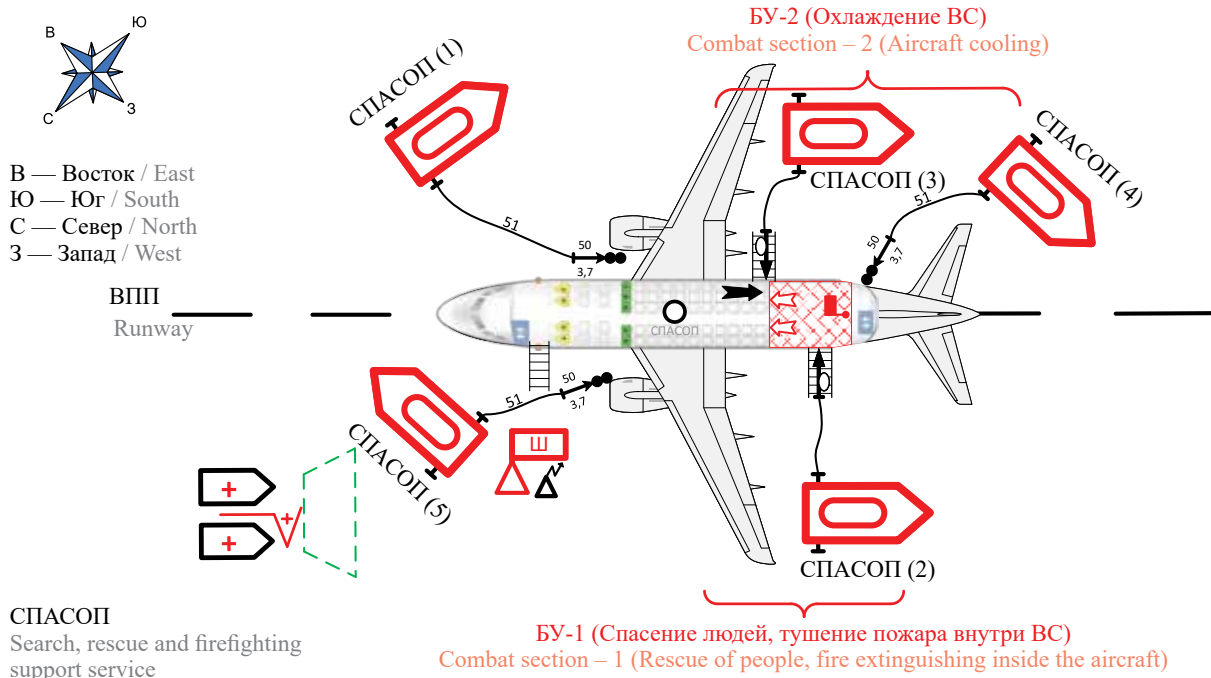


Рис. 13. Расстановка сил и средств при тушении ПВФ самолета Sukhoi Superjet 100 с помощью КОБРЫ (авторский рисунок)

Fig. 13. Arrangement of forces and means during fire extinguishing inside the fuselage of Sukhoi Superjet 100 aircraft using COBRA (author's drawing)

Примем для расчета наихудшее стечение обстоятельств, при котором не все пассажиры успели эвакуироваться из салона, в связи с чем есть необходимость отправить звено ГДЗС на спасение людей.

2. Определяем расстояние, пройденное ПВФ ВС за время свободного развития:

$$L = 0,5 \cdot V_{\text{лин}} \cdot 10 + V_{\text{лин}} \cdot (t_{\text{св}} - 10);$$

$$L = 0,5 \cdot 2,5 \cdot 10 + 2,5 \cdot (10 - 10) = 12,5 \text{ м.}$$

3. Определяем площадь пожара на момент прибытия первого подразделения СПАСОП, достигнув продольных стен пассажирского салона ВС, пожар примет прямоугольную форму.

Ширина пассажирского салона Sukhoi Superjet 100 (А) = 3,24 м:

$$S_{\text{пож}} = A \cdot L;$$

$$S_{\text{пож}} = 3,24 \cdot 12,5 = 40,5 \text{ м}^2.$$

4. Определяем площадь тушения пожара.

Благодаря применению КОБРЫ будет происходить объемное ТП — тушение по всей площади горения, так же, при попадании «точно в цель» — в очаг пламени, огонь будет сбит высоким напором, что максимально повысит эффективность тушения:

$$S_{\text{туш}} = S_{\text{пож}};$$

$$S_{\text{туш}} = 40,5 \text{ м}^2.$$

5. Определяем требуемый расход огнетушащих средств.

Для расчета на ТП примем только 1 из 2 стволов КОБРЫ, так как второй, согласно тактическому замыслу, будет отвечать за прекращение распространения пламени и защиту оставшихся внутри пассажирского салона людей от воздействия ОФП:

$$Q_{\text{туш}}^{\text{тр}} = Q_{\text{к}};$$

$$Q_{\text{туш}}^{\text{тр}} = 1 \text{ л/с,}$$

$$(60 \text{ л/мин} = 1 \text{ л/с}).$$

6. Определяем количество стволов на тушение.

Для ТП необходим 1 ствол КОБРЫ.

7. Определим количество стволов на охлаждение фюзеляжа ВС.

Исходя из боевой обстановки на пожаре ВС и тактических условий, на защиту следует предусмотреть перекрывной ствол с распыленной водой РСК-50 на охлаждение в хвостовой части самолета, а также 2 ствола РСК-50 для охлаждения крыла и шасси ВС, также к количеству стволов на защиту учтем ствол КОБРЫ, который подан внутрь фюзеляжа на отсечение пламени и защиту пострадавших от ОФП:

$$N_{\text{ст}}^{\text{охл}} = 4 \text{ ств. РСК-50} + 1 \text{ ств. «Кобра»};$$

$$Q_{\text{охл}}^{\text{тр}} = q_{\text{ст}}^{\text{б}} \cdot N_{\text{ст}}^{\text{охл}} + Q_{\text{к}};$$

$$Q_{\text{охл}}^{\text{тр}} = 3,7 \cdot 3 + 1 = 12,1 \text{ л/с.}$$

8. Определим общий требуемый расход воды на ТП и охлаждение фюзеляжа ВС:

$$Q_{\text{общ}}^{\text{тр}} = Q_{\text{туш}}^{\text{тр}} + Q_{\text{охл}}^{\text{тр}};$$

$$Q_{\text{общ}}^{\text{тр}} = 1 + 12,1 = 13,1 \text{ л/с.}$$

9. Определим общее количество стволов для локализации пожара:

$$N_{\text{ст}}^{\text{общ}} = N_{\text{ст}}^{\text{туш}} + N_{\text{ст}}^{\text{охл}};$$

$$N_{\text{ст}}^{\text{общ}} = 2 \text{ ств. «Кобра»} + 3 \text{ ств. РСК-50.}$$

10. Определим количество л/с:

- работа с 2 стволами КОБРЫ на ТП — 4 человека (так как для работы со стволом достаточно всего 2 человек (рис. 11));
- работа с 3 стволами РСК-50 на защиту — 3 человека;
- звено ГДЗС на спасение пассажиров — 3 человека;
- РТП — 1 человек;
- для организации бесперебойной подачи воды — 5 человек.

Всего потребуется $N_{\text{л/с}} = 16$ человек.

11. Определим общее количество отделений для локализации пожара:

$$N_{\text{отд}} = \frac{N_{\text{л/с}}}{n};$$

$$N_{\text{отд}} = 16/4 = 4 \text{ отделения.}$$

Результаты

Для обоснования эффективности тактики тушения ПВФ ВС с применением КОБРЫ сравним выходные данные первого и второго расчета:

1. По расходу воды более эффективна тактика ТП с применением КОБРЫ, так как $Q_{\text{общ}}^{\text{тр}}$ при первом варианте был равен 18,5 л/с, а при втором — всего 13,1 л/с, что при необходимости создает возможности как для дополнительного маневра, так и для увеличения времени ТП;

2. По количеству задействованных для ТП отделений, с точки зрения расчета, вторая рассматриваемая тактика ТП не стала эффективнее, так как в обоих случаях будет необходимо задействовать 4 отделения, однако важно помнить, что во втором случае участникам ТП не придется проникать внутрь фюзеляжа, что уберет их от воздействия ОФП, а звену ГДЗС, направленному на спасение, не нужно будет заниматься внутрифюзеляж-



Рис. 14. Предлагаемое авторами графическое отображение КОБРЫ (авторский рисунок)

Fig. 14. The authors' proposed graphical representation of COBRA (author's drawing)

ным тушением (и прокладывать внутрь фюзеляжа рабочую рукавную линию со стволом, что крайне неудобно делать в условиях узкого пассажирского салона), что позволит ему целиком сконцентрироваться на спасении пассажиров. Причем звено ГДЗС будет также защищено от воздействия ОФП благодаря КОБРЕ, поданной на прекращение распространения пожара.

3. С точки зрения времени развертывания отделений и подачи стволов:

- участникам ТП не придется «включаться» в СИЗОД, что позволит после развертывания КОБРЫ ($t = 3$ мин, равное боевому развертыванию обычной рукавной линии) сразу приступить к ТП (время «пробития» фюзеляжа с помощью КОБРЫ равняется 10 с (эмпирически полученные данные), что, несомненно, быстрее, чем путь звена к очагу ПВФ ВС);
- благодаря распыленной воде, проникающей напрямую в очаг горения, ТП происходит объемным способом, что еще и позволяет резко снизить t^0 в зоне горения, в связи с чем пожар будет потушен намного быстрее.

Также важно отметить, что для КОБРЫ не имеется графического отображения в приказе МЧС

России от 16 октября 2017 г. № 444 «Об утверждении Боевого устава подразделений пожарной охраны, определяющего порядок организации ТП и проведения аварийно-спасательных работ», в связи с чем авторами данной работы предлагается свой вариант графического отображения КОБРЫ (рис. 14), а также рекомендуется к внесению в вышеупомянутый приказ МЧС России.

Выводы

На основе сравнения полученных результатов можно сделать вывод о том, что предложенная тактика ТП по всем основополагающим критериям эффективности тушения значительно превосходит стандартную (применяемую в наши дни) тактику тушения ПВФ ВС, в связи с чем авторы статьи рекомендуют к укомплектованию подразделений служб поискового и аварийно-спасательного обеспечения полетов РФ установки КОБРА, которые в данный момент отсутствуют в распоряжении этих служб.

ПВФ ВС происходят весьма регулярно, однако большинство из таких пожаров ВС ликвидируется сразу при обнаружении очага и огонь не успевает перейти на пассажирские кресла или внутреннюю обшивку ВС [19–21]. Однако пожарно-спасательные подразделения СПАСОП всегда должны быть готовы к худшему сценарию развития событий, что позволит им спасти людей, а также снизить возможный экономический ущерб от случившегося пожара, сохранив ВС в целостности. В связи с чем в реалиях современного мира необходимо постоянно совершенствовать технологии, методы и тактику ТП ВС.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Крымский В.В., Головенко В.Р. Особенности управления при тушении воздушных судов пожарными подразделениями // Модели, системы, сети в экономике, технике, природе и обществе. 2023. № 3 (47). С. 115–124. DOI: 10.21685/2227-8486-2023-3-8
2. Крымский В.В., Ильницкий С.В., Гайдукевич А.Е. Автоматизация учета, эксплуатации, испытаний и работы пожарной техники и пожарно-технического вооружения и оборудования // Аудит и финансовый анализ. 2020. № 1. С. 238–242. DOI: 10.38097/AFA.2020.16.25.034
3. Крымский В.В., Головенко В.Р. Современное состояние вопроса управления оперативно-тактическими действиями пожарных подразделений при тушении воздушных судов // Угрозы возникновения чрезвычайных ситуаций на потенциально опасных объектах в условиях проведения специальной военной операции : мат. межвуз. семинара (г. Санкт-Петербург 6 октября 2022 г.). СПб. : С.-Петерб. ун-т ГПС МЧС России, 2022. С. 52–55.
4. Крымский В.В. Оценка ущерба специалистами в области техногенных и природных чрезвычайных ситуаций // Аудит и финансовый анализ. 2016. № 5. С. 408–411.
5. Абрамов А.В., Одинец М.А., Крымский В.В. Анализ методик по оценке эффективности систем для планирования ресурсов предприятия // Проблемы управления рисками в техносфере. 2015. № 1 (33). С. 125–131.
6. Головенко В.Р. Специфика тушения пожаров воздушных судов // Пожаротушение: проблемы, технологии, инновации : мат. VIII Междунар. науч.-практ. конф., в 2 ч. г. Москва, 17–18 марта 2022 г. Ч. 1. М. : Академия ГПС МЧС России, 2022. С. 260–263.

7. Головенко В.Р. Управление действиями пожарных подразделений при крушении самолета // Актуальные вопросы пожаротушения : сб. мат. II Всеросс. круглого стола. г. Иваново, 26 мая 2022 года. Иваново : Ивановская пожарно-спасательная академия ГПС МЧС России, 2022. С. 53–61.
8. Таранцев А.А., Скودтаев С.В. О проблеме безопасности пассажиров при аварийном приводнении самолетов // Морские интеллектуальные технологии. 2023. № 2–1(60). С. 236–244. URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=54045138> DOI: 10.37220/MIT.2023.60.2.029
9. Balychev S.Yu., Batkovskiy A.M., Kravchuk P.V., Trofimets E.N., Trofimets V.Ya. Situational modeling of transportation problems: applied and didactic aspects // *Espacios*. 2018. Vol. 39. Issue 10. P. 27.
10. Lozhkin V., Lozhkina O., Rogozinsky G., Malygin I. On information technology development for monitoring of air pollution by road and water transport in large port cities (St. Petersburg, Vladivostok and Sevastopol) // *Communications in Computer and Information Science*. 2020. Vol. 1201. Pp. 384–396. DOI: 10.1007/978-3-030-46895-8_30
11. Матрохина К.В., Трофимец В.Я., Мазиков Е.Б., Маховиков А.Б., Хайкин М.М. Развитие методологии сценарного анализа инвестиционных проектов предприятий минерально-сырьевого комплекса // *Записки горного института*. 2023. Т. 259. С. 112–124. DOI: 10.31897/PMI.2023.3
12. Mazakov E.B., Matrokhina K.V., Trofimets V.Y. Traffic management at the enterprises of the mineral industry // *Advances in raw material industries for sustainable development goals*. London : CRC Press, 2021. Pp. 397–405. DOI: 10.1201/9781003164395-50
13. Delichatsios M.A. Surface extinction of flames on solids: some interesting results // *Proceedings of the Combustion Institute*. 2007. Vol. 31. Issue 2. Pp. 2749–2756. DOI: 10.1016/j.proci.2006.08.032
14. Trofimets E.N., Trofimets V.Ya. Computer modelling of physical processes described by parabolic type equations // *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*. 2021. Vol. 1047 (1). P. 012140. DOI: 10.1088/1757-899X/1047/1/012140
15. Batkovskiy A.M., Semenova E.G., Trofimets E.N., Trofimets V.Ya., Fomina A.V. Method for adjusting current appropriations under irregular funding conditions // *Journal of Applied Economic Sciences*, Romania: European Research Centre of Managerial Studies in Business Administration. 2016. Vol. XI. Issue 5 (43). Pp. 828–841.
16. Kobayashi Y., Terashima K., Oiwa R., Tokoro M., Takahashi S. Opposed-flow flame spread over carbon fiber reinforced plastic under variable flow velocity and oxygen concentration: the effect of in-plane thermal isotropy and anisotropy // *Proceedings of the Combustion Institute*. 2021. Vol. 38. Issue 3. Pp. 4857–4866. DOI: 10.1016/J.PROCI.2020.06.380
17. Gong J., Zhou X., Li J., Yang L. Effect of finite dimension on downward flame spread over PMMA slabs: experimental and theoretical study // *International Journal of Heat and Mass Transfer*. 2015. Vol. 91. Pp. 225–234. DOI: 10.1016/j.ijheatmasstransfer.2015.07.091
18. Gao S., Zhu G., Gao Y., Zhou J. Experimental study on width effects on downward flame spread over thin PMMA under limited distance condition // *Case Studies in Thermal Engineering*. 2018. Vol. 13. P. 100382. DOI: 10.1016/j.csite.2018.100382
19. Ковырзин М.С., Бочкарев А.Н., Семенов А.Д. К вопросу безотказности установки пожаротушения «Кобра» при подаче огнетушащей пены // Надежность и долговечность машин и механизмов : сб. мат. XII Всеросс. науч.-практ. конф. Иваново, 2021. С. 65–69.
20. Станкус А.Р., Ефименко В.Л. Современная система пожаротушения «Кобра» // *Пожарная и техносферная безопасность: проблемы и пути совершенствования*. 2019. № 3. С. 173–182.
21. Сошнев И.В., Бородин В.А. Применение установки гидроабразивной резки при тушении пожаров и проведении аварийно-спасательных работ // *Актуальные вопросы пожаротушения : сб. мат. II Всеросс. круглого стола, Иваново, 2022. С. 149.*

REFERENCES

1. Krymsky V.V., Golovenko V.R. Features of control when extinguishing aircraft by fire departments. *Models, Systems, and Networks in Economics, Technology, Nature, and Society*. 2023; 3(47):115-124. DOI: 10.21685/2227-8486-2023-3-8 (rus).
2. Krymsky V.V., Ilnitsky S.V., Gaidukevich A.E. Automation of accounting, operation, testing and operation of fire equipment and fire-technical weapons and equipment. *Audit and Financial Analysis*. 2020; 1:238-242. DOI: 10.38097/AFA.2020.16.25.034 (rus).
3. Krymsky V.V., Golovenko V.R. The current state of the issue of managing operational and tactical actions of fire departments when extinguishing aircraft. *Threats of emergency situations at potentially dangerous facilities in conditions of a special military operation : materials of the interuniversity seminar, St. Petersburg, October 6, 2022*. Saint Petersburg, St. Petersburg University of the Ministry of Emergency Situations of Russia, 2022; 52-55. (rus).
4. Krymsky V.V. Assessment of damage by specialists in the field of man-made and natural emergencies. *Audit and Financial Analysis*. 2016; 5:408-411. (rus).

5. Abramov A.V., Odinets M.A., Krymsky V.V. Analysis of methods for evaluating the effectiveness of systems for enterprise resource planning. *Problems of Risk Management in the Technosphere*. 2015; (33):125-131. (rus).
6. Golovenko V.R. Specifics of extinguishing aircraft fires. *Firefighting: problems, technologies, innovations : materials of the VIII Scientific and Practical International Conference, at 2 a.m., Moscow, March 17–18, 2022. Part 1*. Moscow, Academy of the State Fire Service of the Ministry of Civil Defense, Emergencies and Elimination of Consequences of Natural Disasters of the Russian Federation, 2022; 260-263. (rus).
7. Golovenko V.R. Office of the President of the Russian Federation. *Current management issues : collection of materials of the II All-Russian Round Table, Ivanovo, May 26, 2022*. Ivanovo, Ivanovo Fire and Rescue Academy of the Ministry of Emergency Situations of Russia, 2022; 53-61. (rus).
8. Tarantsev A.A., Skodtaev S.V. About the problem of passenger safety during the emergency landing of aircraft. *Marine Intelligent Technologies*. 2023; 2-1(60):236-244. URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=54045138> DOI: 10.37220/MIT.2023.60.2.029 (rus).
9. Balychev S.Yu., Batkovsky A.M., Kravchuk P.V., Trofimets E.N., Trofimets V.Ya. Situational modeling of transport problems: applied and didactic aspects. *Espacios*. 2018; 39(10):27.
10. Lozhkin V., Lozhkina O., Rogozinsky G., Malygin I. On the development of information technologies for monitoring atmospheric air pollution by road and water transport in large port cities (St. Petersburg, Vladivostok and Sevastopol). *Communications in Informatics*. 2020; 1201:384-396. DOI: 10.1007/978-3-030-46895-8_30 (rus).
11. Matrokhina K.V., Trofimets V.Yu., Mazakov E.B., Makhovikov A.B., Khaykin M.M. Development of a methodology for scenario analysis of investment projects of enterprises of the mineral resource complex. *Bulletin of the Mining Institute*. 2023; 259:112-124. DOI: 10.31897/PMI.2023.3 (rus).
12. Mazakov E.B., Matrokhina K.V., Trofimets V.Yu. Traffic flow management at enterprises of the mineral industry. *Achievements in the Raw Materials Industries to Achieve the Goals of Sustainable Development*. London, CRC Press, 2021; 397-405.
13. Delichatsios M.A. Surface flame extinguishing on solids: some interesting results. *Proceedings of the Combustion Institute*. 2007; 31(2):2749-2756. DOI: 10.1016/j.proci.2006.08.032
14. Trofimets E.N., Trofimets V.Ya. Computer modeling of physical processes described by parabolic type equations. *IOP Conference Series : Materials Science and Engineering*. 2021; 1047(1):012140. DOI: 10.1088/1757-899X/1047/1/012140
15. Batkovsky A.M., Semenova E.G., Trofimets E.N., Trofimets V.Ya., Fomina A.V. Method of adjusting current allocations in conditions of irregular financing. *Journal of Applied Economic Sciences, Romania: European Research Center for Management Studies in the field of business administration*. 2016; XI:5(43):828-841.
16. Kobayashi Yu., Terashima K., Oiva R., Tokoro M., Takahashi S. Propagation of the flame of the counterflow through carbon fiber reinforced plastic at variable flow velocity and oxygen concentration: the influence of thermal isotropy and anisotropy in the plane. *Proceedings of the Combustion Institute*. 2021; 38(3):4857-4866. DOI: 10.1016/J.PROCI.2020.06.380
17. Gong J., Zhou H., Li J., Yang L. The effect of finite size on flame propagation down PMMA plates: an experimental and theoretical study. *International Journal of Heat and Mass Transfer*. 2015; 91:225-234. DOI: 10.1016/J.ijheat-masstransfer.2015.07.091
18. Gao S., Zhu G., Gao Yu., Zhou J. Experimental study of the effect of width on flame propagation down a thin PMMA under conditions of limited distance. *Case Studies in Thermal Engineering*. 2018; 13:100382. DOI: 10.1016/j.csite.2018.100382
19. Kovyrzin M.S., Bochkarev A.N., Semenov A.D. On the issue of reliability of the fire extinguishing system “Cobra” when applying fire extinguishing foam. *Reliability and Durability of Machines and Mechanisms : collection of materials of the xii All-Russian scientific and practical conference*. Ivanovo. 2021; 65-69. (rus).
20. Stankus A.R., Efimenko V.L. Modern fire extinguishing system “Cobra”. *Fire and Technosphere Safety: Problems and Ways of Improvement*. 2019; 3:173-182. (rus).
21. Soshnev I.V., Borodin V.A. The use of a waterjet cutting installation in extinguishing fires and conducting emergency rescue operations. Installation for the use of waterjet cutting in firefighting and emergency rescue operations. *Topical Issues of Firefighting : collection of materials II Sun*. Ivanovo, 2022; 149. (rus).

Поступила 24.11.2023, после доработки 10.01.2024;

принята к публикации 22.01.2024

Received November 24, 2023; Received in revised form January 10, 2024;

Accepted January 22, 2024

Информация об авторах

КРЫМСКИЙ Виталий Вячеславович, канд. эконом. наук, доцент, заместитель начальника Института профессиональной подготовки, Санкт-Петербургский университет

Information about the author

Vitaly V. KRYMSKY, Cand. Sci. (Econom.), Docent, Deputy Head of Institute of Professional Training, Saint-Petersburg University of State Fire Service of the Ministry of the Russian Federation

Государственной противопожарной службы Министерства Российской Федерации по делам гражданской обороны, чрезвычайным ситуациям и ликвидации последствий стихийных бедствий имени Героя Российской Федерации генерала армии Е.Н. Зиничева, Россия, 196105, г. Санкт-Петербург, Московский пр-т, 149; ORCID: 0000-0001-8289-691X; e-mail: kvv-1982@yandex.ru

ГОЛОВЕНКО Владислав Романович, адъюнкт факультета подготовки кадров высшей квалификации, Санкт-Петербургский университет Государственной противопожарной службы Министерства Российской Федерации по делам гражданской обороны, чрезвычайным ситуациям и ликвидации последствий стихийных бедствий имени Героя Российской Федерации генерала армии Е.Н. Зиничева, Россия, 196105, г. Санкт-Петербург, Московский пр-т, 149; ORCID: 0000-0003-4187-281X; e-mail: golovenko.vlad@mail.ru

Вклад авторов:

Крымский Виталий Вячеславович — *идея; научное редактирование текста.*

Головенко Владислав Романович — *сбор материала; обработка материала, написание статьи.*

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

ration for Civil Defense, Emergencies and Elimination on Consequences of Natural Disasters named after Hero of the Russian Federation, Army General E.N. Zinichev, Moskovskiy Avenue, 149, Saint Petersburg, 196105, Russian Federation; ORCID: 0000-0001-8289-691X; e-mail: kvv-1982@yandex.ru

Vladislav R. GOLOVENKO, Postgraduate Student, Saint-Petersburg University of State Fire Service of the Ministry of the Russian Federation for Civil Defense, Emergencies and Elimination on Consequences of Natural Disasters named after Hero of the Russian Federation, Army General E.N. Zinichev, Moskovskiy Avenue, 149, Saint Petersburg, 196105, Russian Federation; ORCID: 0000-0003-4187-281X; e-mail: golovenko.vlad@mail.ru

Contribution of the authors:

Vitaly V. Krymsky — *idea; scientific text editing.*

Vladislav V. Golovenko — *collecting material; processing material, writing an article.*

The authors declare no conflicts of interests.

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, предложениями, гипотезами, описанными в работе.

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

В описании источников необходимо указывать всех авторов.

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

Список литературы должен содержать не менее 20 источников (в это число не входят нормативные документы, патенты, ссылки на сайты компаний и т.п.). При этом количество ссылок на статьи из иностранных научных журналов и другие иностранные источники должно быть не менее 40 % от общего количества ссылок. Не более половины от оставшихся 60 % должны составлять статьи из русскоязычных научных журналов, остальное — другие первоисточники на русском языке.

Не менее половины источников должно быть включено в один из ведущих индексов цитирования: Российский индекс научного цитирования eLibrary, Web of Science, Scopus, Chemical Abstracts, MathSciNet, Springer и др. В случае присвоения публикациям цифрового идентификатора объекта (DOI) его необходимо указать, что позволит однозначно идентифицировать объект в базах данных.

Состав источников должен быть актуальным и содержать не менее половины современных (не старше 10 лет) статей из научных журналов или других публикаций.

В списке литературы должно быть не более 30 % источников, автором либо соавтором которых является автор статьи.

Следует обратить внимание на публикации диссертаций (особенно докторских), защищенных в последние годы по ближайшей научной специальности или группе специальностей. Для поиска рекомендуется использовать ресурс <http://www.dissercat.com>.

Не следует включать в список литературы ГОСТы; ссылки на них должны быть даны непосредственно по тексту статьи.

Убедитесь, что указанная в списке литературы информация (Ф.И.О. автора, название книги или журнала, год издания, том, номер и количество (интервал) страниц) верна.

Неопубликованные результаты, проекты документов, личные сообщения и т.п. не следует указывать в списке литературы, но они могут быть упомянуты в тексте.

2.8. References (пристайные списки литературы на английском языке). Представление в References только транслитерированного (без перевода) описания недопустимо. Обращаем Ваше внимание, что перевод названия статей следует давать так, как он проходил при их публикации, а перевод названий журналов должен быть официально принятым. Произвольное сокращение названий источников цитирования приведет к невозможности идентифицировать ссылку в электронных базах данных.

При составлении References необходимо следовать схеме:

- ИОФ авторов (транслитерация; для ее написания используйте сайт <http://fotosav.ru/services/transliteration.aspx>, обязательно включив в настройках справа сверху 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!