

4-2019

FIRE and EXPLOSION
SAFETY

ПОЖАРОВЗРЫВО-

БЕЗОПАСНОСТЬ



НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКИЙ ЖУРНАЛ

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

КОМПЛЕКСНАЯ БЕЗОПАСНОСТЬ

пожарная • промышленная • производственная • экологическая



СКОЛЬКО ЧЕЛОВЕК
ПОГИБАЕТ
ПРИ ПОЖАРАХ
В МИРЕ?

KAZAKHSTAN SECURITY SYSTEMS

www.kss-expo.kz

V Международная
выставка-конференция
по безопасности
и гражданской
защите

МАСШТАБНОЕ
КОНГРЕССНОЕ
МЕРОПРИЯТИЕ
В ЦЕНТРАЛЬНОЙ
АЗИИ

1-3 октября, 2019

Дворец Независимости
Астана, Республика Казахстан

Справки по телефонам:

+7 (7172) 52 42 33, +7 (7172) 52 42 80

Организатор:

АЕХКС

Выставочная
компания
«Астана-Экспо КС»

Официальная поддержка:



Министерство
внутренних
дел РК



Комитет
национальной
безопасности РК



Министерство обороны
и аэрокосмической
промышленности РК

Стратегические партнеры:

KASPERSKY



RONEX Security

№4 ТОМ 28
2019



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

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

Адрес:

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

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

РЕДАКЦИЯ:

Зав. редакцией **Корольченко О. Н.**

Шеф-редактор **Соколова Н. Н.**

Редактор **Крылова Л. В.**

Адрес редакции:

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

Адрес для переписки:

121352, Россия, г. Москва, а/я 6.

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

E-mail: info@fire-smi.ru

https://www.fire-smi.ru

Журнал включен в перечень ведущих рецензи-
руемых научных журналов и изданий, реко-
мендованных ВАК России для публикации
трудов соискателей ученых степеней, в Рефе-
ративный журнал и базы данных ВИНТИ РАН,
в базу данных Российского индекса научного
цитирования (РИНЦ), в базу данных Russian
Science Citation Index на платформе Web
of Science, в справочно-библиографическую
службу EBSCO. Сведения о журнале ежегодно
публикуются в Международной справочной
системе по периодическим и продолжающимся
изданиям "Ulrich's Periodicals Directory".
Переводные версии статей журнала входят
в Международный реферативный журнал
"Chemical Abstracts".

Перепечатка материалов журнала "Пожаро-
взрывобезопасность/Fire and Explosion Safety"
только по согласованию с редакцией.
При цитировании ссылка обязательна.
Авторы и рекламодатели несут ответственность
за содержание представленных в редакцию
материалов и публикацию их в открытой
печати.
Мнение редакции не всегда совпадает с мне-
нием авторов опубликованных материалов.

Подписано в печать 12.08.2019.

Выход в свет 23.08.2019.

Формат 60x84 1/8. Тираж 2000 экз.

Бумага мелованная матовая.

Печать офсетная. Цена свободная.

Распространяется по подписке.

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

ГЛАВНЫЙ РЕДАКТОР:

Корольченко А. Я., д. т. н., профессор, академик МАНЭБ (Национальный иссле-
довательский Московский государственный строительный университет, Москва,
Россия)

ЗАМ. ГЛАВНОГО РЕДАКТОРА:

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

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

РЕДАКЦИОННАЯ КОЛЛЕГИЯ:

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

Поландов Ю. Х., д. т. н., профессор (Орловский государственный университет
им. И. С. Тургенева, Орел, Россия)

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

СОДЕРЖАНИЕ

CONTENTS

ОБЩИЕ ВОПРОСЫ КОМПЛЕКСНОЙ БЕЗОПАСНОСТИ

GENERAL QUESTIONS OF COMPLEX SAFETY

А. Б. СИВЕНКОВ, С. Ю. ЖУРАВЛЕВ,
Ю. Ю. ЖУРАВЛЕВ, М. В. МЕДЯНИК
Об эффективности применения противопожарных
дверей в снижении предельно допустимых
значений опасных факторов пожара и величины
пожарного риска в зданиях и сооружениях
различного функционального назначения

6

A. B. SIVENKOV, S. Yu. ZHURAVLEV,
Yu. Yu. ZHURAVLEV, M. V. MEDYANIK
About efficiency of application of fire-prevention
doors in reduction of dangerous factors
of the fire and size of fire risk in buildings
and constructions of various functional
purpose

МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ, ЧИСЛЕННЫЕ МЕТОДЫ И КОМПЛЕКСЫ ПРОГРАММ

MATHEMATICAL MODELING, NUMERICAL METHODS AND PROGRAM COMPLEXES

О. П. КОРОБЕЙНИЧЕВ, И. Е. ГЕРАСИМОВ,
М. Б. ГОНЧИКЖАПОВ, А. Г. ТЕРЕЩЕНКО, Р. К. ГЛАЗНЕВ,
С. А. ТРУБАЧЕВ, А. Г. ШМАКОВ, А. А. ПАЛЕЦКИЙ,
А. И. КАРПОВ, А. А. ШАКЛЕИН, А. КУМАР, В. РАГХАВАН
Экспериментальное исследование и численное
моделирование распространения пламени
по поверхности пластины ПММА

15

O. P. KOROBEINICHEV, I. E. GERASIMOV, M. B.
GONCHIKZHAPOV, A. G. TERESHCHENKO, R. K. GLAZNEV,
S. A. TRUBACHEV, A. G. SHMAKOV, A. A. PALETSKY,
A. I. KARPOV, A. A. SHAKLEIN, A. KUMAR, V. RAGHAVAN
An experimental study and numerical
simulation of flame spread over surface
of PMMA slab

Е. С. МАРКУС, А. Ю. СНЕГИРЕВ, Е. А. КУЗНЕЦОВ,
Л. Т. ТАНКЛЕВСКИЙ, А. В. АРАКЧЕЕВ
Численное моделирование распространения пламени
по дискретной совокупности горючих материалов

29

E. S. MARKUS, A. Yu. SNEGIREV, E. A. KUZNETSOV,
L. T. TANKLEVSKIY, A. V. ARAKCHEEV
Simulation of flame spread
over discrete fire load

ЭЛЕКТРОТЕХНИКА

ELECTRICAL ENGINEERING

А. И. НЕДОБИТКОВ
Особенности токовой перегрузки в автомобильной
электрической сети

42

A. I. NEDOBITKOV
Peculiarities of current overload
in the car electric network

СТАТИСТИКА И СИСТЕМНЫЙ АНАЛИЗ

STATISTICS AND SYSTEM ANALYSIS

Н. Н. БРУШЛИНСКИЙ, С. В. СОКОЛОВ, О. В. ИВАНОВА
Сколько человек погибает при пожарах в мире?

51

N. N. BRUSLINSKIY, S. V. SOKOLOV, O. V. IVANOVA
How many fire deaths are in the world?

АВТОМАТИЗИРОВАННЫЕ СИСТЕМЫ И СРЕДСТВА

AUTOMATED SYSTEMS AND MEANS

Л. М. МЕШМАН, В. А. БЫЛИНКИН, Ю. И. ГОРБАНЬ,
М. Ю. ГОРБАНЬ, К. Ю. ФОКИЧЕВА
Актуальные проблемы навигации на очаг пожара
пожарных роботизированных стволов
в роботизированных установках пожаротушения.
Часть 2. Программы управления ПРС при тушении
статическими струями с учетом компоновки ПРС
относительно очага пожара

63

L. M. MESHMAN, V. A. BYLINKIN, Yu. I. GORBAN,
M. Yu. GORBAN, K. Yu. FOKICHEVA
Actual problems of positioning of the robotic monitors
to fire area in robotic fire suppression systems.
Part 2. RFM operating programs
for fire extinguishing with static streams
considering RFMs positioning
to fire area

Д. М. ГОРДИЕНКО, В. И. ЛОГИНОВ, Ю. Н. ОСИПОВ,
В. И. ЕРШОВ, Е. Д. МИХАЙЛОВА
Проблемы использования беспилотных авиационных
систем для тушения пожаров в зданиях
повышенной этажности

82

D. M. GORDIENKO, V. I. LOGINOV, Yu. N. OSIPOV,
V. I. ERSHOV, E. D. MIKHAYLOVA
On unmanned aircraft systems application
for fire extinguishing in high-rise
buildings

ВОПРОС – ОТВЕТ

QUESTION – ANSWER

А. С. ХАРЛАМЕНКОВ
Новая классификация взрывоопасных зон

92

A. S. KHARLAMENKOV
New classification of hazardous areas

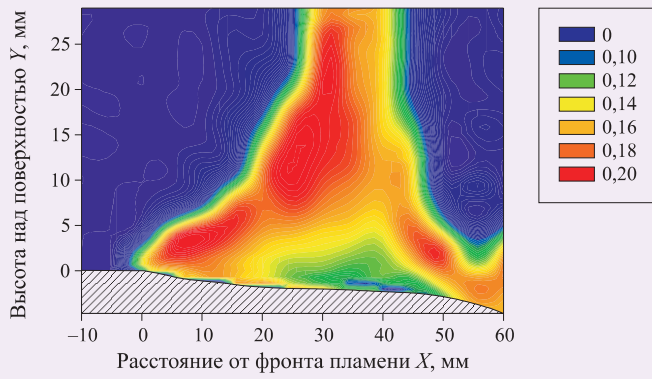
ОСНОВНАЯ ЦЕЛЬ ЖУРНАЛА –
ознакомление международного сообщества
с результатами исследований, проводимых
российскими и зарубежными учеными
в области комплексной безопасности.

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.



Об эффективности применения противопожарных дверей

Стр. 6



Стр. 15

Исследование распространения пламени по поверхности ПММА



Прогнозирование развития пожара на высокостеллажном складе

Стр. 29



Стр. 51

Сколько человек погибает при пожарах в мире?



Беспилотные авиационные системы для тушения пожаров

Стр. 82



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

Address:

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

Journal founded in 1992,
issued 6 times per year.

Publication is registered by the Federal
Service for Supervision of Communications,
Information Technology, and Mass Media
of Russia. Registration certificate
PI No. FS 77-43615 on January 18, 2011.
DOI prefix: 10.18322.

EDITORIAL STAFF:

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

Editorial Director **N. N. Sokolova**

Editor **L. V. Krylova**

Address of Editorial Staff:

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

Corresponding to: Post office box 6,
Moscow, 121352, Russia.

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

E-mail: info@fire-smi

https://www.fire-smi.ru

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

No part of this publication may be used or re-
produced in any form or by any means without
the prior permission of the Publishers. Repro-
ducing any part of this material a reference
to the journal is obligatory.

Authors and advertisers account for contents
of given papers and for publishing in the open
press.

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

Signed for printing 12.08.2019.

Date of publication 23.08.2019.

Format is 60x84 1/8.

Printing is 2000 copies.

Chalk-overlay mat paper.

Offset printing. Free price.

Journal sells subscription.

Printed at “Gran Pri”, Ltd.

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

EDITOR-IN-CHIEF:

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

DEPUTY EDITOR-IN-CHIEF:

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

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

EDITORIAL BOARD:

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

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

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

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

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

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

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

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

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 (Orel State University named after I. Tur-
genev, Orel, Russia)

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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



ТЕЛ.: +7 (343) 239-66-44
E-MAIL: SF@SOUZPROMEXPO.RU

У ВЫСТАВКА ТЕХНОЛОГИЙ, ТОВАРОВ И УСЛУГ ДЛЯ ПОЖАРНОЙ И ОБЩЕСТВЕННОЙ БЕЗОПАСНОСТИ

С 24 ПО 26 СЕНТЯБРЯ 2019

РК «КОСМОС» УЛ. ДЗЕРЖИНСКОГО, Д. 2
Г. ЕКАТЕРИНБУРГ

РЕКЛАМА



Уполномоченный по правам ребёнка
в Свердловской области



<https://doi.org/10.18322/PVB.2019.28.04.6-14>

УДК 614.841.3

Об эффективности применения противопожарных дверей в снижении предельно допустимых значений опасных факторов пожара и величины пожарного риска в зданиях и сооружениях различного функционального назначения

© А. Б. Сивенков¹, С. Ю. Журавлев², Ю. Ю. Журавлев², М. В. Медяник³✉

¹ Академия ГПС МЧС России (Россия, 129366, г. Москва, ул. Бориса Галушкина, 4)

² ООО «НИЭЦ ПБ» (Россия, 129343, г. Москва, ул. Докукина, 8, стр. 2, офис 314)

³ Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет (Россия, 129337, г. Москва, Ярославское шоссе, 26)

РЕЗЮМЕ

Введение. В настоящий момент положения нормативных документов, регламентирующих расчеты величины пожарного риска, нуждаются в актуализации и уточнении в узконаправленных проблемных вопросах.

Методика. Существующая нормативная база представлена по большей части ведомственным приказом МЧС России. По мере развития технологий пожаротушения и противопожарного нормирования, а также расчетных методов, способных смоделировать ту или иную аварийную ситуацию, расширились возможности обоснования различных сценариев развития пожара. Опыты расчетов по объектам разного функционального назначения, выполненным ведущими научными организациями нашей страны, а также специалистами, занимающимися расчетами пожарных рисков, показали актуальность и необходимость внесения изменений и уточнений в нормативную базу, регламентирующую данные виды работ. В то же время следует особо отметить тот факт, что вышеуказанные ведомственные нормы и рекомендации, несмотря на их практическую значимость, не рассматривают вопрос об использовании противопожарных дверей в практических целях и не могут служить тем задачам, которые ставит перед собой современность.

Результаты и обсуждение. Вследствие имеющихся проблем в проектировании и прохождении государственной экспертизы сдаче объектов в эксплуатацию органам строительного надзора и надзору за объектами, уже эксплуатируемыми органами государственного пожарного надзора МЧС России, практически повсеместно предшествует процедура разработки расчетов величины пожарного риска для подтверждения соответствия объектов защиты требованиям пожарной безопасности. Особенность проведения таких расчетов заключается прежде всего в необходимости представления таковых на конкретный объект капитального строительства. При этом в ряде случаев даже наличие всех систем противопожарной защиты здания не обеспечивает безопасность людей по разным причинам, главной из которых является быстрая блокировка опасными факторами пожара путей эвакуации и, как следствие, гибель людей.

Выводы. Вопрос учета использования противопожарных дверей при расчетах пожарного риска, не раз применяемых на различных объектах защиты и подтвердивших свою эффективность на существующих объектах, представляется целесообразным отразить в соответствующих нормативных документах, что в значительной степени будет способствовать улучшению фактической безопасности людей.

Ключевые слова: пожар; пожарная безопасность; практическое применение методики; системы противопожарной защиты; обоснование исходных данных; расчет риска.

Для цитирования: 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. — Т. 28, № 4. — С. 6–14. DOI: 10.18322/PVB.2019.28.04.6-14.

✉ Медяник Михаил Валерьевич, e-mail: mihalmel@yandex.ru

About efficiency of application of fire-prevention doors in reduction of dangerous factors of the fire and size of fire risk in buildings and constructions of various functional purpose

© Andrew B. Sivenkov¹, Sergey Yu. Zhuravlev², Yuri Yu. Zhuravlev², Mikhail V. Medyanik³✉

¹ State Fire Academy of Emercom of Russia (Borisa Galushkina St., 4, Moscow, 129366, Russian Federation)

² NIEC PB LLC (Dokukina St., 8, bldg. 2, office 314, Moscow, 129343, Russian Federation)

³ National Research Moscow State University of Civil Engineering (Yaroslavskoye Shosse, 26, Moscow, 129337, Russian Federation)

ABSTRACT

Introduction. At the moment, the provisions of regulatory documents governing fire risk calculations need updating and clarification in narrowly focused problem issues.

Methods. The existing regulatory framework is presented for the most part by the departmental order of Emercom of Russia. With the development of fire-fighting and fire-fighting technologies, as well as computational methods capable of simulating this or that emergency situation, the possibility of substantiating various fire development scenarios has expanded. Experiments on calculations for objects of various functional purposes, issued by leading scientific organizations of our country, as well as specialists involved in fire risk calculations, have shown the relevance and the need for changes and clarifications in the regulatory framework governing these types of work. At the same time, it should be noted that the above-mentioned departmental norms and recommendations, despite their practical significance, do not reflect the issue of using fire doors for practical purposes and cannot serve the tasks that modernity sets for itself.

Results and discussion. Due to the existing problems of design and state examination, commissioning of construction supervision bodies and supervision of objects already operated by state fire supervision authorities Emercom of Russia, is almost universally preceded by the development of fire risk calculations in order to confirm fire protection objects. The peculiarity of such calculations is, first of all, the need to present those to a specific capital construction object, while in some cases even the presence of all the fire protection systems of a building does not ensure people's safety due to various reasons. The main one of which is the rapid blocking of evacuation routes by fire and resulting in death of people.

Conclusions. The use of fire doors in the calculations of fire risk, which are used more than once at various protection facilities and confirmed their effectiveness at the implemented facilities, seems appropriate to reflect in the relevant regulatory documents, which will greatly improve the actual safety of people.

Keywords: fire; fire hazards; practical application of the methodology; fire protection system; justification of the accepted initial data; risk calculating.

For citation: A. B. Sivenkov, S. Yu. Zhuravlev, Yu. Yu. Zhuravlev, M. V. Medyanik. About efficiency of application of fire-prevention doors in reduction of dangerous factors of the fire and size of fire risk in buildings and constructions of various functional purpose. *Pozharovzryvobezopasnost/Fire and Explosion Safety*, 2019, vol. 28, no. 4, pp. 6–14 (in Russian). DOI: 10.18322/PVB.2019.28.04.6-14.

✉ Mikhail Valeryevich Medyanik, e-mail: mihalmed@yandex.ru

Введение

Обеспечение пожарной безопасности для зданий и сооружений жилого, общественного и промышленного назначения согласно положениям ФЗ № 69 [1] является важнейшей государственной задачей. Наиболее эффективный инструмент оценки уровня обеспечения пожарной безопасности — независимая оценка пожарного риска, включающая в себя: оценку соответствия объекта защиты требованиям пожарной безопасности, проверку соблюдения организациями и гражданами противопожарного режима. Данные процедуры должны проводиться не заинтересованным в результатах оценки или проверки экспертом в области оценки пожарного риска.

Для установления соответствия объекта защиты требованиям пожарной безопасности Техническим регламентом о требованиях пожарной безопасности (Федеральный закон № 123-ФЗ) (далее — ФЗ № 123) [2] и нормативно-правовыми актами Российской Федерации регламентируется процедура проведения оценки пожарного риска.

Оценка пожарного риска осуществляется путем определения расчетных величин пожарного риска на объекте защиты и сопоставления их с соответствующими нормативными значениями, установленными в соответствии с ФЗ № 123 [2]. Расчетные величины пожарного риска являются количественной мерой возможности реализации пожарной опасности объекта защиты и ее последствий для людей и материальных ценностей.

Расчет пожарных рисков для общественных зданий проводится по методике, утвержденной приказом МЧС России № 382 [3] (далее — Методика), с учетом изменений, внесенных в нее в 2011 и 2015 гг. [4].

В соответствии с положениями, изложенными в разд. IV п. 21 Методики [3], в случае если расчетная величина индивидуального пожарного риска превышает нормативное значение, в здании следует предусмотреть дополнительные противопожарные мероприятия, направленные на снижение величины пожарного риска. К числу таких мероприятий относятся [3]:

- применение дополнительных объемно-планировочных решений и средств, обеспечивающих ограничение распространения пожара;
- устройство дополнительных эвакуационных путей и выходов;
- установка систем оповещения людей о пожаре и управления эвакуацией людей повышенного типа;
- организация поэтапной эвакуации людей из здания;
- применение систем противодымной защиты;
- устройство систем автоматического пожаротушения;
- ограничение количества людей в здании до значений, обеспечивающих безопасность их эвакуации из здания.

Одним из наиболее распространенных мероприятий, способных ограничивать развитие опасных

факторов пожара (ОФП), а также снижать величину пожарного риска, является применение противопожарных дверей. Однако вопрос эффективности противопожарных дверей в плане снижения вероятности воздействия ОФП на людей и уменьшения величины пожарного риска не имеет нормативной и методической проработки.

Вследствие этого на практике при оценке величины пожарного риска на объекте защиты возможность применения противопожарных дверей с устройствами для самозакрывания (доводчиками) для вышеуказанных целей фактически не учитывается.

С учетом вышеизложенного для исключения фактов некомпетентного применения требований федеральных законов и нормативных документов авторами поставлена задача: установить эффективность применения противопожарных дверей в плане снижения предельно допустимых значений ОФП и величины пожарного риска в общественных зданиях; обосновать необходимость учета применения противопожарных дверей при определении динамики нарастания опасных факторов пожара, что окажется полезным в практике применения требований нормативно-правовых документов или при разрешении возникающих спорных ситуаций.

Методика расчета и используемые программные комплексы

В соответствии с требованиями Методики [3] определение расчетных величин пожарного риска для зданий и сооружений осуществляется на основании:

- анализа пожарной опасности здания;
- определения частоты реализации пожароопасных ситуаций;
- построения полей опасных факторов пожара для различных сценариев его развития;
- оценки последствий воздействия опасных факторов пожара на людей при различных сценариях его развития;
- наличия систем обеспечения пожарной безопасности здания.

Одной из ключевых позиций расчета пожарного риска, непосредственным образом влияющей на трудоемкость, стоимость, а в конечном счете и на правильность выводов расчета, является построение полей опасных факторов пожара для различных сценариев его развития.

На основании требований Методики [3] при проведении расчета должны быть приняты самые неблагоприятные сценарии развития пожара, определяемые на основе анализа горючей нагрузки и путей распространения ОФП.

Построение полей опасных факторов пожара для различных сценариев его развития осуществляется с целью определить необходимое время эвакуации людей, которое рассчитывается как произведение критической для человека продолжительности пожара на коэффициент безопасности. Предполагается, что каждый опасный фактор пожара воздействует на человека независимо от других [3].

Критическая продолжительность пожара для людей определяется из условия достижения одним из ОФП своего предельно допустимого значения, которое устанавливается расчетом. С учетом разд. II Методики [3] выбирается метод моделирования, формулируется математическая модель, соответствующая определенному сценарию, и проводится моделирование динамики развития пожара. На основании полученных результатов рассчитывается время достижения каждым из опасных факторов пожара предельно допустимого значения на путях эвакуации.

Согласно требованиям Методики [3] применяются три основные группы математических моделей для определения динамики нарастания ОФП — интегральные, зонные (зональные) и полевые.

Ст. 89 № 123-ФЗ [2] требует организации безопасной (своевременной и беспрепятственной) эвакуации людей из здания. Кроме того, согласно требованиям Методики [3] при определении расчетных величин пожарного риска требуется установить вероятность эвакуации людей.

Под своевременностью эвакуации понимается необходимость покинуть здание при пожаре до достижения в помещениях и на путях эвакуации предельно допустимых уровней воздействия на людей опасных факторов пожара, определяемого динамикой их распространения при различных вариантах функционирования систем защиты. Своевременность эвакуации является краеугольным камнем обеспечения пожарной безопасности здания в целом и решающим фактором, влияющим на величину пожарного риска. В случае несоблюдения условия своевременности эвакуации людей величина пожарного риска априори будет превышать нормативное значение, установленное статьей 79 № 123-ФЗ [2], что детально было рассмотрено в различных работах зарубежных и отечественных экспертов в области обеспечения пожарной безопасности [5–18].

Таким образом, основной задачей при проведении расчета пожарного риска будет построение полей опасных факторов пожара в целях определения времени достижения ими предельных значений.

В настоящее время в Российской Федерации существует несколько программных комплексов, реализующих положения Методики [3] и позволяющих выполнить оценку пожарного риска в соответствии со ст. 79 № 123-ФЗ [2].

Среди большого многообразия различных программных комплексов наибольшее распространение получили именно те, которые реализуют полевую модель развития пожара и индивидуально-поточную модель движения людских потоков, а именно: “Fenix+2”, “Fogard”, “Сигма ПБ”, “PyroSim”, “Pathfinder”. Этим программам отдают предпочтение большинство специалистов, проводящих расчеты пожарного риска. При этом стоит отметить, что при моделировании пожара с помощью указанных программных комплексов используется модуль FDS (Fire Dynamic Simulator), разработанный в научно-исследовательской лаборатории по пожарной безопасности Национального института стандартов и технологий (NIST) США. Исключение составляет программа “Сигма ПБ”, которая для выполнения расчетов распространения ОФП и проведения эвакуации использует вычислительные ядра отечественных программ соответственно Sigma Fire и Sigma Eva, в которых реализованы полевая модель пожара и модель эвакуации индивидуально-поточного движения людских потоков.

В указанных программах при проведении расчетов опасных факторов пожара можно смоделировать установку противопожарных дверей с наличием устройства самозакрывания (доводчика) для ограничения распространения пожара. Следует также отметить, что требования к оснащению противопожарных дверей устройством самозакрывания (доводчиком) изложены в ГОСТ Р 56177–2014 “Устройства закрывания дверей (доводчики). Технические условия”. Из вышеизложенного следует вывод о том, что оценка возможности применения противопожарных дверей на путях эвакуации при проведении расчетов пожарного риска в настоящее время технически реализуема.

Для проведения подобной оценки было выполнено моделирование динамики развития пожара по полевой модели с помощью программы FDS (Fire Dynamic Simulator).

Кроме того, было реализовано моделирование эвакуации людей с использованием индивидуально-поточной модели движения людей с помощью программного комплекса Fenix+2.

Результаты и их обсуждение

При проведении расчета величины пожарного риска для объектов общественного назначения основная задача состояла в оценке возможности использования противопожарных дверей в целях ограничения распространения пожара в рамках применения для его обеспечения дополнительных объемно-планировочных решений и средств.

Обоснование возможности применения проектного решения по установке противопожарных две-

рей рассмотрено на примере расчета и сравнения времени эвакуации с временем блокирования расчетных точек для двух вариантов:

- с применением противопожарных дверей;
- без применения противопожарных дверей.

Мерой воздействия опасных факторов пожара на людей является соотношение времени блокирования ими путей эвакуации и времени эвакуации. Объемно-планировочные решения взяты для подвального помещения здания общественного назначения с двумя эвакуационными выходами.

По результатам исследования предполагается сформулировать вывод о возможности или невозможности ограничения распространения пожара посредством установки противопожарных дверей при обосновании распространения ОФП в рамках проведения расчета пожарного риска.

Выбор расчетной модели базируется на анализе объемно-планировочных решений объекта и особенностях сценария развития пожара.

Полевая модель прогнозирования опасных факторов пожара является наиболее универсальной из существующих детерминированных моделей, поскольку она основана на решении уравнений в частных производных в каждой точке расчетной области. С помощью полевой модели прогнозирования ОФП возможно рассчитать температуру в помещении очага пожара и в смежных помещениях, скорость движения воздушных потоков, концентрацию токсичных продуктов горения и т. д. в каждой точке расчетной области [19]. Следовательно, полевая модель может обоснованно использоваться:

- для научных исследований в целях выявления закономерностей развития пожара;
- при сравнительных расчетах в целях апробации и совершенствования зональных и интегральных моделей как менее универсальных в точностном и качественном отношениях, а также при проверке обоснованности их применения [20];
- при выборе рационального варианта противопожарной защиты конкретных объектов защиты.

В своей основе полевая модель не содержит никаких априорных допущений и благодаря этому принципиально применима для моделирования различных сценариев развития пожара.

С учетом вышеизложенного моделирование динамики развития пожара проводилось с использованием полевой модели с помощью программы FDS.

В качестве исходных данных был принят подвал общественного здания с расположенными в нем офисами (два помещения) и кладовой (одно помещение).

В качестве помещения очага пожара с размещением пожарной нагрузки была принята кладовая, расположенная по центру модели (подвального этажа),

Таблица 1. Параметры пожарной нагрузки**Table 1.** Fire load parameters

Параметр Parameter	Единица измерения Unit of measurement	Значение Value
Низшая теплота сгорания Net calorific value	кДж/кг kJ/kg	14000
Линейная скорость распространения пламени Linear flame propagation speed	м/с m/sec	0,042
Удельная массовая скорость выгорания Specific mass burnout rate	кг/(м ² · с) kg/(m ² · sec)	0,0129
Коэффициент полноты сгорания Combustion ratio	—	0,93
Удельная мощность Power density	кВт/м ² kW/m ²	167,958
Дымообразующая способность Smoke forming ability	Нп · м ² /кг Np · m ² /kg	53
Потребление кислорода (O ₂) Oxygen consumption (O ₂)	кг/кг kg/kg	1,161
Выделение углекислого газа (CO ₂) / CO ₂ release	кг/кг kg/kg	0,642
Выделение угарного газа (CO) Carbon monoxide (CO) emissions	кг/кг kg/kg	0,0317
Выделение хлористого водорода (HCl) Isolation of hydrogen chloride (HCl)	кг/кг kg/kg	0

с типовой пожарной нагрузкой, характерной для подсобных и бытовых помещений. Сведения о принятых параметрах пожарной нагрузки принимались на основании данных, приведенных в пособии [21] (табл. 1).

Моделировалась динамика развития пожара в течение 240 с.

На этаже подвала регистраторы располагали на уровне 1,7 м (на высоте 1,7 м от уровня этажа) (рис. 1).

В соответствии с объемно-планировочными решениями здания, геометрическими размерами эвакуационных путей и выходов, а также с известными особенностями поведения людей при пожарах (движение к более широким и хорошо заметным выходам, выбор более короткого пути эвакуации, использование знакомых маршрутов движения и т. п.) был проведен расчет времени эвакуации людей с учетом наличия системы оповещения и управления эвакуацией людей при пожаре (СОУЭ) 2-го типа. В расчете было принято, что на этаже подвала находится 13 чел. Анализ времени прохождения людей через регистраторы представлен в табл. 2.

Результаты сравнительного анализа блокирования путей эвакуации ОФП с учетом открытых дверных проемов (в случае использования типовых дверей) продемонстрированы на рис. 2.

Как видно из рис. 2, еще до начала эвакуации людей из офисных помещений пути эвакуации оказались заблокированными, а значит, требование табл. 5.1 Методики [3] с учетом времени начала эвакуации не выполнено.

Для оценки распространения опасных факторов пожара по путям эвакуации с учетом наличия противопожарных дверей с доводчиком было проведено моделирование распространения ОФП по подвалу здания (рис. 3).

После возгорания начинается процесс эвакуации людей из помещений в коридор подвала. На 31-й секунде от начала возгорания происходит закрытие противопожарной двери в помещении очага пожара (кладовой) посредством доводчика (рис. 4).

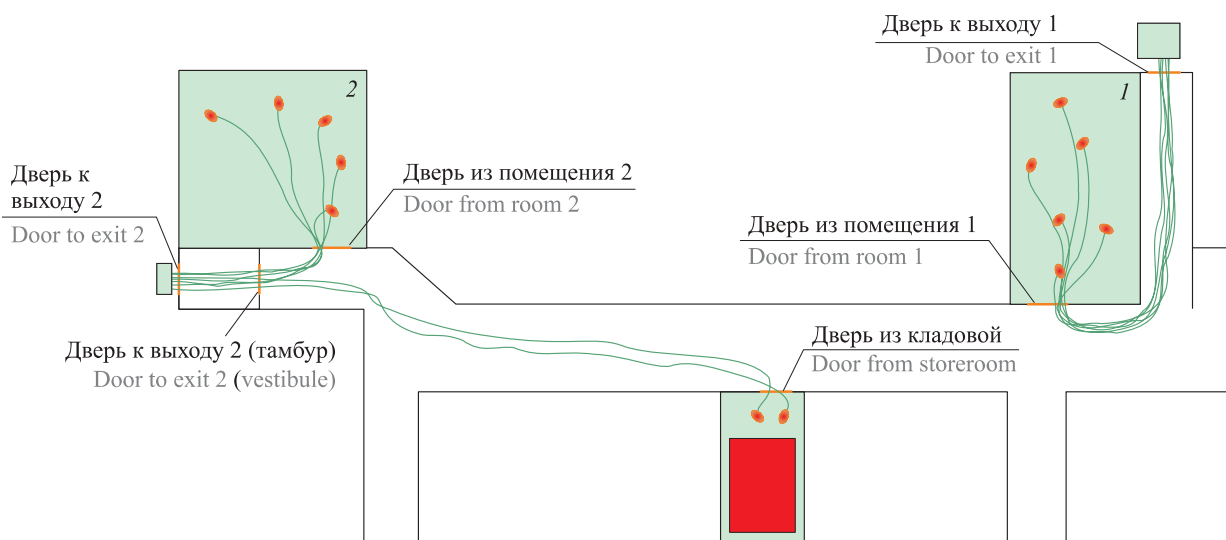
**Рис. 1.** Пожарная модель подвала со схемой нахождения людей и траекторий их движения при эвакуации**Fig. 1.** The fire model of the basement with the scheme of finding people and their trajectories during evacuation

Таблица 2. Статистика прохождения регистраторов в подвале / **Table 2.** Statistics of the passage of recorders in basement

Расположение Location	Наименование Name	Время прохождения регистратора, с Time of passage of recorder, sec		Количество людей, прошед- ших регистратор, чел. Number of people, pers.
		первого first	последнего last	
Помещение 1 / Room 1	Дверь из помещения 1 / Door from room 1	180,6	183,8	6
Помещение 2 / Room 2	Дверь из помещения 2 / Door from room 2	180,8	183,2	5
Помещение 3 / Room 3	Дверь из кладовой / Door from the pantry	5,6	5,8	2
Вне помещений / Out- doors	Дверь, ведущая к выходу 2 / Door leading to exit 2	17,4	186,4	7
	Дверь, ведущая к выходу 2 (тамбур) / Door leading to exit 2 (vestibule)	15,8	184,8	7
	Дверь, ведущая к выходу 1 / Door leading to exit 1	187,0	190,8	6

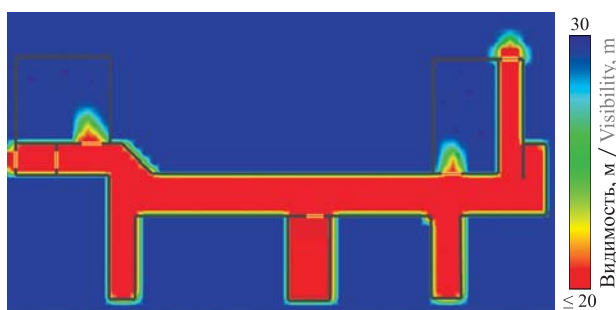


Рис. 2. Пожарная модель подвала: момент блокирования путей эвакуации по потере видимости через 69,8 с от начала возгорания без учета противопожарных дверей с доводчиком
Fig. 2. Basement fire model: the moment of blocking escape routes due to loss of visibility through 69.8 sec from the onset of ignition, without taking into account fire doors with a door closer

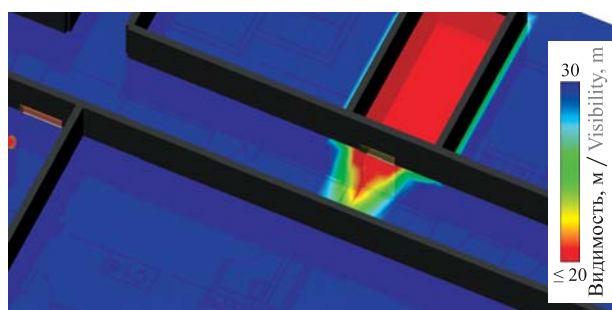


Рис. 4. Пожарная модель подвала: момент закрытия противопожарной двери посредством доводчика кладовой через 31,2 с от начала возгорания
Fig. 4. Basement fire model: the moment of closing the fire door through the closet of the pantry through 31.2 sec from the onset of fire

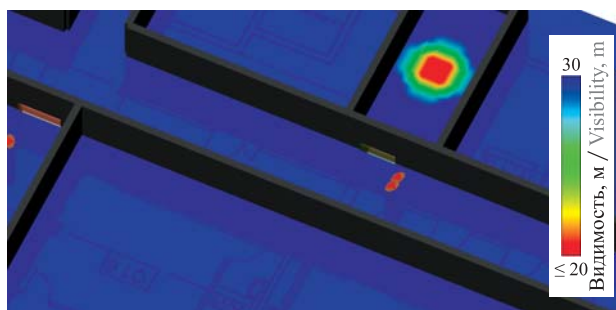


Рис. 3. Пожарная модель подвала: момент эвакуации из помещения кладовой через 6 с от начала возгорания с учетом противопожарных дверей с доводчиком
Fig. 3. Basement fire model: the moment of evacuation from the storeroom after 6 sec from the beginning of the fire, taking into account fire doors with a door closer

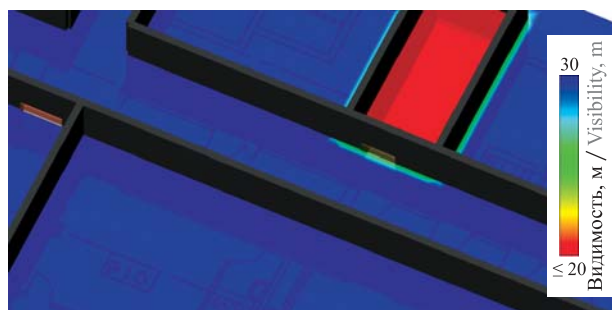


Рис. 5. Пожарная модель подвала: момент закрытия противопожарной двери посредством доводчика кладовой (время моделирования 240 с)
Fig. 5. The fire model of the basement: the moment of closing the fire door through the closet of the pantry (simulation time 240 sec)

Важным обстоятельством является тот факт, что после закрытия противопожарной двери посредством доводчика распространения опасных факторов пожара в коридор этажа и далее по эвакуационным путям не происходит, а значит, люди на путях эвакуации не будут подвержены воздействию ОФП (рис. 5).

Анализ проведенных расчетов показал, что использование в качестве дополнительного мероприятия по ограничению распространения пожара противопожарных дверей с доводчиком является важным элементом в обеспечении безопасной эвакуации людей до наступления критических для организма человека значений опасных факторов пожара.

Выводы

1. Результаты моделирования позволили оценить возможность использования противопожарных дверей при расчетах пожарного риска и отнести их к средствам, обеспечивающим ограничение распространения пожара в соответствии с п. 21 Методики [3].

2. Наличие устройств самозакрывания на противопожарных дверях является эффективным мероприятием противопожарной защиты зданий и сооружений различного функционального назначения, которое значительно ограничивает распространение опасных факторов пожара по путям эвакуации и обеспечивает безопасную эвакуацию людей при пожаре.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. О пожарной безопасности : Федер. закон РФ от 21.12.1994 № 69-ФЗ (в ред. от 28.05.2017). URL: http://www.consultant.ru/document/cons_doc_LAW_5438/ (дата обращения: 15.03.2018).
2. Технический регламент о требованиях пожарной безопасности : Федер. закон РФ от 22.07.2008 № 123-ФЗ (в ред. от 29.07.2017). URL: <http://docs.cntd.ru/document/902111644> (дата обращения: 15.01.2018).
3. Методика определения расчетных величин пожарного риска в зданиях, сооружениях и строениях различных классов функциональной пожарной опасности : приказ МЧС России от 30.06.2009 № 382 (ред. от 02.12.2015). URL: <http://base.garant.ru/12169057/> (дата обращения: 10.03.2019).
4. О внесении изменений в приказ МЧС России от 30.06.2009 № 382 : приказ МЧС России от 02.12.2015 № 632. URL: <http://ivo.garant.ru/#/document/71296390/paragraph/1:0> (дата обращения: 10.03.2019).
5. Холщевников В. В., Самошин Д. А., Парфененко А. П., Кудрин И. С., Истратов Р. Н., Белосохов И. Р. Эвакуация и поведение людей при пожарах : учеб. пособие. — М. : Академия ГПС МЧС России, 2015. — 262 с.
6. Холщевников В. В., Самошин Д. А. Эвакуация и поведение людей при пожарах. — М. : Академия ГПС МЧС России, 2009. — 212 с.
7. Айбуев З. С.-А., Исаевич И. И., Медяник М. В. Свободное движение людей в потоке и проблемы индивидуально-поточного моделирования // Пожаровзрывобезопасность/Fire and Explosion Safety. — 2015. — Т. 24, № 6. — С. 66–73.
8. Карпов В. Л., Медяник М. В. О необходимости реализации процесса превентивного спасения людей при пожаре в уникальных высотных зданиях // Пожаровзрывобезопасность/Fire and Explosion Safety. — 2017. — Т. 26, № 8. — С. 25–30. DOI: 10.18322/PVB.2017.26.08.25-30.
9. Kuligowski E. D., Peacock R. D. A review of building evacuation models / National Institute of Standards and Technology // Technical Note 1471. — Washington : U. S. Department of Commerce, 2005. — 156 p. URL: https://ws680.nist.gov/publication/get_pdf.cfm?pub_id=902501 (дата обращения: 20.03.2019).
10. Guan Heng Yeoh, Kwok Kit Yuen (eds.). Computational fluid dynamics in fire engineering: theory, modelling and practice. — Oxford : Butterworth-Heinemann, 2009. — 544 p. DOI: 10.1016/B978-0-7506-8589-4.X0001-4.
11. Hermes. Investigation of an evacuation assistant for use in emergencies during large-scale public events / Institute for Advanced Simulation (IAS), 2011. URL: https://www.fz-juelich.de/ias/jsc/EN/Research/ModellingSimulation/CivilSecurityTraffic/Projects/Hermes/_node.html (дата обращения: 25.03.2019).
12. Schadschneider A., Klingsch W., Klüpfel H., Kretz T., Rogsch C., Seyfried A. Evacuation dynamics: empirical results, modeling and applications // Encyclopedia of Complexity and System Science / Meyers R. (ed.). — New York : Springer, 2009. — P. 3142–3176. DOI: 10.1007/978-0-387-30440-3_187.
13. Frantzich H., Nilsson D. Evacuation experiments in a smoke filled tunnel // Third International Symposium on Human Behaviour in Fire. — Belfast, United Kingdom, 1–3 September, 2004. — P. 229–238.
14. Grandison A. J., Galea E. R., Patel M. K. Fire modelling standards/benchmark Report on Phase 1 Simulations. URL: <https://www.yumpu.com/en/document/view/39470611/fire-modelling-standards-benchmark-report-on-phase-1-> (дата обращения: 25.03.2019).
15. Kang K. A smoke model and its application for smoke management in an underground mass transit station // Fire Safety Journal. — 2007. — Vol. 42, Issue 3. — P. 218–231. DOI: 10.1016/j.firesaf.2006.10.003.
16. Hanea D. M. Human risk of fire: Building a decision support tool using Bayesian networks. — Netherlands : Wöhrmann Print Service, 2009. — 227 p. URL: file:///F:/Fire%20Journal/2019/04%202019/Work%2004'2019/Hanea_PhDThesis.pdf (дата обращения: 25.03.2019).

17. Kholshchevnikov V., Korolchenko D., Zosimova O. Efficiency evaluation criteria of communication paths structure in a complex of buildings of maternity and child-care institutions // MATEC Web of Conferences. — 2017. — Vol. 106, Article No. 01037. — 11 p. DOI 10.1051/mateconf/201710601037.
18. Medyanik M., Zosimova O. Key problems of fire safety enforcement in traffic and communication centers (TCC) // IOP Conference Series: Earth and Environmental Science. — 2017. — Vol. 90, Article No. 012151. DOI: 10.1088/1755-1315/90/1/012151.
19. Рыжов А. М., Хасанов И. Р., Карпов А. В., Волков А. В., Лицкевич В. В., Дектерев А. А. Применение полевого метода математического моделирования пожаров в помещениях : метод. реком. — М. : ВНИИПО МЧС России, 2003. — 46 с.
20. Серебренников Д. С., Литвинцев К. Ю. Обзор моделей распространения дыма и определения дальности видимости // Технологии техносферной безопасности. — 2011. — № 1(35). — 6 с. URL: <http://agps-2006.narod.ru/ttb/2011-1/06-01-11.ttb.pdf> (дата обращения: 25.03.2019).
21. Пособие по применению “Методики определения расчетных величин пожарного риска в зданиях, сооружениях и строениях различных классов функциональной пожарной опасности”. — 2-е изд., испр. и доп. / А. А. Абашкин, А. В. Карпов, Д. В. Ушаков, М. В. Фомин, А. Н. Гилетич, П. М. Комков, Д. А. Самошин. — М. : ВНИИПО, 2014. — 226 с.

REFERENCES

1. *On fire safety*. Federal Law of the Russian Federation on 21 December 1994 No. 69-FZ (ed. on 28 May 2017) (in Russian). Available at: http://www.consultant.ru/document/cons_doc_LAW_5438/ (Accessed 15 March 2019).
2. *Technical regulations for fire safety requirements*. Federal Law of the Russian Federation on 22 July 2008 No. 123-FZ (ed. on 29 July 2017) (in Russian). Available at: <http://docs.cntd.ru/document/902111644> (Accessed 15 January 2019).
3. *Methodology for fire risk determining in buildings and structures of different fire danger*. Order of Emercom of Russian Federation on 30 June 2009 No. 382 (ed. on 2 December 2015) (in Russian). Available at: <http://base.garant.ru/12169057/> (Accessed 10 December 2018).
4. *On amendments to the Order of Emercom of Russia on 30 June 2009 No. 382*. Order of Emercom of Russia on 2 December 2015 No. 632 (in Russian). Available at: <http://ivo.garant.ru/#/document/71296390/paragraph/1:0> (Accessed 10 March 2019).
5. V. V. Kholshchevnikov, D. A. Samoshin, A. P. Parfenenko, I. S. Kudrin, R. N. Istratov, I. R. Belosokhov. *Evakuatsiya i povedeniye lyudey pri pozharakh* [Evacuation and behavior of people during fires]. Moscow, State Fire Academy of Emercom of Russia Publ., 2015. 262 p. (in Russian).
6. V. V. Kholshchevnikov, D. A. Samoshin. *Evakuatsiya i povedeniye lyudey pri pozharakh* [Evacuation and behavior of people during fires]. Moscow, State Fire Academy of Emercom of Russia Publ., 2009. 212 p. (in Russian).
7. Z. S.-A. Aybuev, I. I. Isaevich, M. V. Medyanik. Free movement of people in a stream and problems of individual and line modeling. *Pozharovzryvbezopasnost/Fire and Explosion Safety*, 2015, vol. 24, no. 6, pp. 66–73 (in Russian).
8. V. L. Karpov, M. V. Medyanik. About the necessity of realization of process of preventive rescue of people during the fire in a unique high-rise buildings. *Pozharovzryvbezopasnost/Fire and Explosion Safety*, 2017, vol. 26, no. 8, pp. 25–30 (in Russian). DOI: 10.18322/PVB.2017.26.08.25-30.
9. E. D. Kuligowski, R. D. Peacock. *A review of building evacuation models*. National Institute of Standards and Technology. Technical Note 1471. Washington, U. S. Department of Commerce, 2005. 156 p. Available at: https://ws680.nist.gov/publication/get_pdf.cfm?pub_id=902501 (Accessed 20 March 2019).
10. Guan Heng Yeoh, Kwok Kit Yuen (eds.). *Computational fluid dynamics in fire engineering: theory, modelling and practice*. Oxford, Butterworth-Heinemann, 2009, 544 p. DOI: 10.1016/B978-0-7506-8589-4.X0001-4.
11. Hermes — Investigation of an evacuation assistant for use in emergencies during large-scale public events. Institute for Advanced Simulation (IAS), 2011. Available at: https://www.fz-juelich.de/ias/jsc/EN/Research/ModellingSimulation/CivilSecurityTraffic/Projects/Hermes/_node.html (Accessed 25 March 2019).
12. A. Schadschneider, W. Klingsch, H. Klüpfel, T. Kretz, C. Rogsch, A. Seyfried. Evacuation dynamics: empirical results, modeling and applications. In: R. Meyers (ed.). *Encyclopedia of Complexity and System Science*. New York, Springer, 2009, pp. 3142–3176. DOI: 10.1007/978-0-387-30440-3_187.

13. H. Frantzich, D. Nilsson. Evacuation experiments in a smoke filled tunnel. In: *Proceedings of Third International Symposium on Human Behaviour in Fire*. Belfast, United Kingdom, 1–3 September, 2004, pp. 229–238.
14. A. J. Grandison, E. R. Galea, M. K. Patel. *Fire modelling standards/benchmark Report on Phase 1 Simulations*. Available at: <https://www.yumpu.com/en/document/view/39470611/fire-modelling-standards-benchmark-report-on-phase-1> - (Accessed 25 March 2019).
15. K. Kang. A smoke model and its application for smoke management in an underground mass transit station. *Fire Safety Journal*, 2007, vol. 42, issue 3, pp. 218–231. DOI: 10.1016/j.firesaf.2006.10.003.
16. D. M. Hanea. *Human risk of fire: Building a decision support tool using Bayesian networks*. Netherlands, Wöhrmann Print Service, 2009. 227 p. Available at: file:///F:/Fire%20Journal/2019/04%202019/Work%2004'2019/Hanea_PhDThesis.pdf (Accessed 25 March 2019).
17. V. Kholshchevnikov, D. Korolchenko, O. Zosimova. Efficiency evaluation criteria of communication paths structure in a complex of buildings of maternity and child-care institutions. *MATEC Web of Conferences*, 2017, vol. 106, article no. 01037. 11 p. DOI: 10.1051/mateconf/201710601037.
18. M. Medyanik, O. Zosimova. Key problems of fire safety enforcement in traffic and communication centers (TCC). *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, 2017, vol. 90, article no. 012151. DOI: 10.1088/1755-1315/90/1/012151.
19. A. M. Ryzhov, I. R. Khasanov, A. V. Karpov, A. V. Volkov, V. V. Litskevich, A. A. Dekterev. *Primeniye polevogo metoda matematicheskogo modelirovaniya pozharov v pomeshcheniyakh* [Application of the field method of mathematical modeling of fires in rooms]. Moscow, VNIPO Publ., 2003. 46 p. (in Russian).
20. D. S. Serebrennikov, K. Yu. Litvintsev. Overview of smoke propagation models and modeling smoke visibility. *Tekhnologii tekhnosfernoy bezopasnosti / Technology of Technosphere Safety*, 2011, no. 1(35), 6 p. (in Russian). Available at: <http://agps-2006.narod.ru/ttb/2011-1/06-01-11.ttb.pdf> (Accessed 25 March 2019).
21. A. A. Abashkin, A. V. Karpov, D. V. Ushakov, M. V. Fomin, A. N. Giletich, P. M. Komkov, D. A. Samoshin. *Posobiye po primeneniyu Metodiki opredeleniya raschetnykh velichin pozharnogo riska v zdaniyakh, sooruzheniyakh i stroyeniyakh razlichnykh klassov funktsionalnoy pozharnoy opasnosti* [Handbook on the application of “Methods for determining the calculated values of fire risk in buildings, structures and structures of various classes of functional fire hazard”]. 2nd ed. Moscow, VNIPO Publ., 2014. 226 p. (in Russian).

Поступила 25.04.2019; после доработки 18.05.2019; принята к публикации 20.05.2019
Received 25 April 2019; received in revised form 18 May 2019; accepted 20 May 2019

Информация об авторах

СИВЕНКОВ Андрей Борисович, д-р техн. наук, профессор, Академик НАНПБ, профессор кафедры пожарной безопасности в строительстве, Учебно-научный центр проблем пожарной безопасности в строительстве Академии ГПС МЧС России, г. Москва, Российская Федерация; ORCID: 0000-0003-2783-6089; e-mail: sivenkov01@mail.ru

ЖУРАВЛЕВ Сергей Юрьевич, канд. техн. наук, доцент, чл.-корр. НАНПБ, технический директор ООО “НИЭЦ ПБ”, г. Москва, Российская Федерация; ORCID: 0000-0003-4390-3149; e-mail: zhur01@mail.ru

ЖУРАВЛЕВ Юрий Юрьевич, начальник нормативно-технического отдела ООО “НИЭЦ ПБ”, г. Москва, Российская Федерация; ORCID: 0000-0001-8017-9642; e-mail: zhur001@mail.ru

МЕДЯНИК Михаил Валерьевич, старший преподаватель кафедры комплексной безопасности в строительстве, Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет, г. Москва, Российская Федерация; ORCID: 0000-0001-9994-7074; e-mail: mihalmed@yandex.ru

Information about the authors

Andrew B. SIVENKOV, Dr. Sci. (Eng.), Professor, Academician of the National Academy of Fire Safety Sciences, Professor of Department of Fire Safety in Construction, Training and Research Center for Fire Safety Problems in Construction, State Fire Academy of Emercom of Russia, Moscow, Russian Federation; ORCID: 0000-0003-2783-6089; e-mail: sivenkov01@mail.ru

Sergey Yu. ZHURAVLEV, Cand. Sci. (Eng.), Associate Professor, Member of the National Academy of Fire Safety Sciences, Technical Director of NIEC PB LLC, Moscow, Russian Federation; ORCID: 0000-0003-4390-3149; e-mail: zhur01@mail.ru

Yuri Yu. ZHURAVLEV, Head of the Regulatory and Technical Department, NIEC PB LLC, Moscow, Russian Federation; ORCID: 0000-0001-8017-9642; e-mail: zhur001@mail.ru

Mikhail V. MEDYANIK, Senior Lecturer, Department of Integrated Safety in Civil Engineering, National Research Moscow State University of Civil Engineering, Moscow, Russian Federation; ORCID: 0000-0001-9994-7074; e-mail: mihalmed@yandex.ru

<https://doi.org/10.18322/PVB.2019.28.04.15-28>

УДК 614.841.41

Экспериментальное исследование и численное моделирование распространения пламени по поверхности пластины ПММА

© О. П. Коробейничев^{1✉}, И. Е. Герасимов¹, М. Б. Гончикжапов¹,
А. Г. Терещенко¹, Р. К. Глазнев², С. А. Трубачев², А. Г. Шмаков¹,
А. А. Палецкий¹, А. И. Карпов³, А. А. Шаклеин³, А. Кумар⁴, В. Рагхаван⁴

¹ Институт химической кинетики и горения им. В. В. Воеводского СО РАН (Россия, 630090, г. Новосибирск, ул. Институтская, 3)

² Новосибирский государственный университет (Россия, 630090, г. Новосибирск, ул. Пирогова, 2)

³ Институт механики УрО РАН (Россия, 426067, г. Ижевск, ул. Т. Барамзиной, 34)

⁴ Индийский институт технологии Мадрас (Индия, 600036, г. Ченнай)

РЕЗЮМЕ

Введение. Полимерные материалы находят широкое применение, поэтому актуальной задачей является разработка модели горения полимеров для предсказания их поведения при пожаре и снижение горючести. Данная работа посвящена экспериментальному и численному исследованию распространения пламени по поверхности горизонтально и вертикально расположенных пластин полимера в неподвижном воздухе.

Методика. Объектом исследования был литой полиметилметакрилат (ПММА). Экспериментальные исследования были сфокусированы на измерении пространственных распределений концентраций веществ и температуры в газовой фазе. Температура измерялась с помощью микротермопар (размером 50 мкм). Для измерения пространственного распределения концентраций веществ в пламени использовалась зондовая масс-спектрометрия.

Результаты и обсуждение. В пламени были идентифицированы основные компоненты, включая метилметакрилат (ММА), O₂, CO₂, H₂O, N₂, C₂H₄ (этилен), C₃H₆ (пропилен), и измерены их профили концентраций на разных расстояниях от фронта пламени. Установлено, что химическая структура пламени находится в хорошем согласии с тепловой структурой; размер «темной зоны» пламени, в которой температура вблизи поверхности полимера минимальна, хорошо коррелирует с размером свободной от кислорода зоны. Были также измерены такие характеристики горения, как массовая скорость выгорания, линейная скорость распространения пламени, ширина зоны пиролиза и распределение температуры в конденсированной фазе. На основе экспериментальных результатов были определены плотности кондуктивного и радиационного тепловых потоков от пламени к поверхности полимера. Расчет плотности радиационного потока выполнен в предположении оптически тонкой модели. Проведено моделирование распространения пламени по горизонтальной поверхности ПММА с помощью двумерной сопряженной ламинарной модели горения, учитывающей одностадийные реакции в газовой и конденсированной фазах. Моделирование распространения пламени по вертикальной поверхности ПММА проводилось с помощью экономичной модели в программном пакете FDS.

Заключение. Показано, что разработанная модель хорошо описывает такие параметры, как массовая скорость горения, скорость распространения пламени, а также распределение температуры и концентраций веществ вблизи фронта пламени.

Ключевые слова: распространение пламени; горение ПММА; структура пламени; микротермопара; зондовая масс-спектрометрия; тепловой поток; сопряженная модель горения; FDS-моделирование.

Исследование выполнено при поддержке Российского научного фонда (грант № 16-49-02017).

Для цитирования: Коробейничев О. П., Герасимов И. Е., Гончикжапов М. Б., Терещенко А. Г., Глазнев Р. К., Трубачев С. А., Шмаков А. Г., Палецкий А. А., Карпов А. И., Шаклеин А. А., Кумар А., Рагхаван В. Экспериментальное исследование и численное моделирование распространения пламени по поверхности пластины ПММА // Пожаровзрывобезопасность/Fire and Explosion Safety. — 2019. — Т. 28, № 4. — С. 15–28. DOI: 10.18322/PVB.2019.28.04.15-28.

✉ Коробейничев Олег Павлович, e-mail: korobein@kinetics.nsc.ru

An experimental study and numerical simulation of flame spread over surface of PMMA slab

© Oleg P. Korobeinichev^{1✉}, Ilya E. Gerasimov¹, Munko B. Gonchikzhapov¹,
Aleksander G. Tereshchenko¹, Roman K. Glaznev², Stanislav A. Trubachev²,
Andrey G. Shmakov¹, Aleksander A. Paletsky¹, Aleksander I. Karpov³,
Artem A. Shaklein³, Amit Kumar⁴, Vasudevan Raghavan⁴

- 1 Voevodsky Institute of Chemical Kinetics and Combustion SB RAS (Institutskaya St., 3, Novosibirsk, 630090, Russian Federation)
- 2 Novosibirsk State University (Pirogova St., 2, Novosibirsk, 630090, Russian Federation)
- 3 Institute of Mechanics UB RAS (T. Baramzinoy St., 34, Izhevsk, 426067, Russian Federation)
- 4 Indian Institute of Technology Madras (Chennai, 600036, India)

ABSTRACT

Introduction. Polymer materials are widely used, however the actual object is to provide polymers combustion model to predict their behavior under fire, and reducing flammability. The work is devoted to the experimental study and numerical simulation of flame propagation over the surface of horizontally and vertically placed slabs of polymer in still air.

Methods. The object of the investigation was cast polymethylmethacrylate (PMMA). The experiment was focused on measurement of the spatial distributions of the temperature and species concentrations of the PMMA pyrolysis and combustion products in the gas-phase over the surface of PMMA. Temperature was measured by micro-thermocouple with diameter of 50 microns. Probe mass-spectrometry was used for the measurement of the spatial distribution of species concentrations in the flame.

Results and discussion. The main species (methylmethacrylate (MMA), O_2 , CO_2 , H_2O , N_2 , C_2H_4 (ethylene), C_3H_6 (propylene)) were identified and their concentration profiles were measured on the different distance from the flame front. The chemical structure of the flame was established to be in good agreement with the thermal one. The size of the “dark zone” of the flame, in which the temperature near the surface of the polymer is minimal, correlated well with the size of the oxygen-free zone. The mass burning rate, the velocity of flame propagation, the width of the pyrolysis zone and the temperature distribution in the condensed phase were also measured. Based on the experimental results, densities of conductive and radiation heat fluxes from the flame to the fuel surface were determined. Calculation of the radiation heat flux density was carried out under the assumption of an optically thin model. Modeling of the horizontal flame propagation over the PMMA surface was carried out using a two-dimensional conjugated laminar combustion model that takes into account one-step reactions — the decomposition reaction of PMMA in the condensed phase and the oxidation of decomposition products in the gas phase. Modeling of the vertical flame propagation over the PMMA surface was carried out using economical model of FDS.

Conclusion. The model was shown to describe satisfactorily the experimental data such as the mass burning rate, flame propagation velocity, as well as the temperature distribution and concentration of species near the flame front.

Keywords: flame spread; PMMA combustion; flame structure; microthermocouple; probing mass spectrometry; heat flux; coupled combustion model; modeling by FDS.

The study was supported by the Russian Science Foundation (grant No. 16-49-02017).

For citation: O. P. Korobeinichev, I. E. Gerasimov, M. B. Gonchikzhapov, A. G. Tereshchenko, R. K. Glaznev, S. A. Trubachev, A. G. Shmakov, A. A. Paletsky, A. I. Karpov, A. A. Shaklein, A. Kumar, V. Raghavan. An experimental study and numerical simulation of flame spread over surface of PMMA slab. *Pozharovzryvobezopasnost/ Fire and Explosion Safety*, 2019, vol. 28, no. 4, pp. 15–28 (in Russian). DOI: 10.18322/PVB.2019.28.04.15-28.

✉ Oleg Pavlovich Korobeinichev, e-mail: korobein@kinetics.nsc.ru

Введение

Полимерные материалы находят широкое применение во всех сферах нашей жизни. В связи с ростом в последнее время числа пожаров актуальным является предсказание поведения этих материалов при пожаре и снижения их горючести [1–7]. Важный вклад в решение этой проблемы вносит разработка модели горения полимерных материалов. Распространение пламени по поверхности полимеров при их горении представляет собой один из ключевых процессов. Его понимание необходимо для оценки рисков возникновения пожаров и моделирования их распространения. Среди различных, используемых на практике полимеров наибольшее внимание исследователей уделяется полиметилметакрилату (ПММА), что обосновано сравнительно простым механизмом его разложения и сгоранием без образования угольного остатка. Все это вместе с его достаточно высокой распространенностью делает ПММА одним из наиболее удобных модельных полимеров для ис-

следования распространения пламени. В настоящей работе рассматриваются два относительно медленных процесса — распространение пламени по горизонтальной поверхности и распространение пламени по вертикальной поверхности сверху вниз. Такая постановка эксперимента сравнительно проста и удобна для теоретического анализа и измерения тепловой и химической структуры пламени.

В литературе имеется несколько упрощенных теоретических моделей распространения пламени, которые включают в себя механизмы передачи тепла по поверхности полимера в пограничном слое. В ряде работ, посвященных численному моделированию распространения пламени по поверхности полимера [8–15], модель включает уравнения сохранения энергии с химическими реакциями как в газовой, так и в конденсированной фазах. Тем не менее сопоставление результатов численного моделирования с экспериментальными данными встречается лишь в ограниченном числе работ.

Экспериментальное исследование распространения пламени по пластинам ПММА проводилось при горизонтальной ориентации образцов [[16–22], а также при вертикальной ориентации [9, 10, 15, 23–26]. В этих исследованиях показана зависимость скорости распространения пламени от толщины образцов, их геометрических размеров, скорости набегающего потока и процентного содержания кислорода в окружающей атмосфере. Большинство исследователей сходятся во мнении, что по мере распространения пламени происходит смена доминирующего механизма теплообмена. На ранних стадиях пожара это происходит главным образом за счет кондуктивного теплового потока из пламени в поверхность полимера, а по мере увеличения размера пламени основную роль начинает играть передача тепла за счет теплового излучения. В то время как на ранних стадиях пожара доминирующим процессом теплопереноса является теплопроводность через твердую поверхность полимера, по мере увеличения размера пламени все большее значение приобретает тепловое излучение.

Тем не менее современные исследования и модели горения полимеров недостаточно учитывают химический аспект процесса горения, поскольку на данный момент химическая структура пламени, распространяющегося по поверхности полимерных материалов, практически не исследована. Таким образом, эта информация будет очень полезна для разработки детальной модели распространения пламени по поверхности полимеров с учетом кинетики

пиролиза топлива, а также реакций окисления продуктов пиролиза в газовой фазе.

Целью настоящей работы является исследование тепловой и химической структуры пламени при его распространении по поверхности пластин ПММА, а также разработка численных моделей этого процесса на основе этих данных.

1. Методика эксперимента

В работе проводилось исследование горения литых пластин ПММА (производитель — Marga Cipta brand, Индия) шириной 100 мм, толщиной 5 мм и длиной 150 мм. Некоторые физико-химические характеристики исследованного образца таковы: средний молекулярный вес $MW = 13,8 \cdot 10^5$ г/моль, плотность $\rho_s = 1,16$ г/см³, эффективная теплота пиролиза $H_p = (1026 \pm 60)$ Дж/г, теплота газификации $Q_g = (2010 \pm 60)$ Дж/г.

Схема установки показана на рис. 1. Пластины помещались в тонкую металлическую раму (толщиной 0,2 мм), чтобы предотвратить распространение пламени по боковым поверхностям. В случае изучения распространения пламени по горизонтальной поверхности ПММА (см. рис. 1,а) образец располагали на негорючей теплоизоляционной пластине толщиной 10 мм, которая устанавливалась на электронных весах для определения массовой скорости выгорания. Зажигание пластин производилось с торца пламенем пропан-бутановой горелки. Скорость распространения пламени по поверхности полимера определяли по видеозаписи, сделанной в ходе эксперимента. Измерение структуры пламени начинали

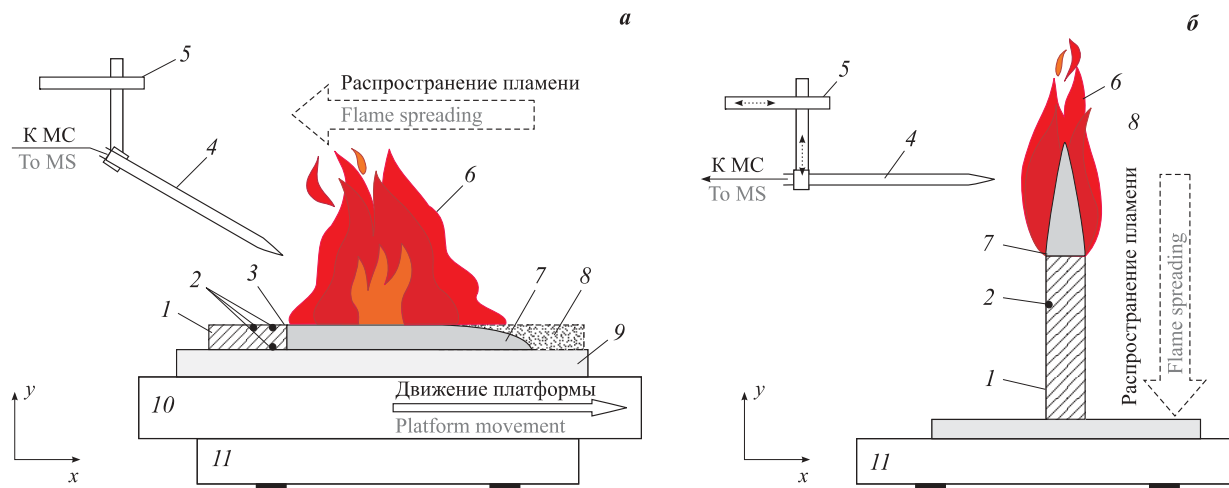


Рис. 1. Экспериментальная установка для исследования горизонтального (а) и вертикального (б) распространения пламени по поверхности полимера и измерения профилей температуры и концентрации веществ: 1 — исходный образец; 2 — термопары в конденсированной фазе; 3 — линия стеклования; 4 — зонд или термопара; 5 — 3D-сканер; 6 — пламя; 7 — зона пиролиза; 8 — зона выгорания; 9 — термоизоляционная подложка; 10 — подвижная платформа; 11 — весы

Fig. 1. Experimental setup for the study of horizontal (a) and vertical (b) flame spread over the polymer surface and for measuring temperature and concentration profiles: 1 — virgin sample; 2 — thermocouples in the condensed phase; 3 — glass transition line; 4 — probe or thermocouple; 5 — 3D-scanner; 6 — flame; 7 — pyrolysis zone; 8 — burnout zone; 9 — thermally insulated plate; 10 — movable platform; 11 — balance

только после того, как скорость распространения пламени стабилизировалась. Гашение образцов производили до того, как пламя достигало конца образца, для определения размера и контура сечения зоны пиролиза. Затухшие образцы разрезали посередине в продольном направлении для определения контура сечения зоны пиролиза. Потушенную поверхность полимера фотографировали и измеряли длину зоны пиролиза L_p (расстояние от фронта пламени до линии полного выгорания образца) и ее площадь. Линию начала зоны пиролиза рассматривали как фронт пламени.

Измерение температуры внутри образца и на поверхности ПММА производилось термопарами, для изготовления которых использовалась проволока диаметром 50 мкм из платины и платины с добавлением 10 % родия (Pt/Pt + 10 % Rh). Термопары устанавливали так, как показано на рис. 1. Каждую из них помещали в канавку глубиной 0,2–0,3 мм, сделанную на поверхности пластины, а затем заливали 50 %-ным раствором ПММА в дихлорэтаноле.

Для измерения температуры в пламени использовалась термопара из Pt/Pt + 10 % Rh, изготовленная из проволоки толщиной 50 мкм и покрытая тонким слоем диоксида кремния SiO_2 толщиной 10 мкм для предотвращения каталитических реакций на поверхности термопары. Плечи термопары имели длину 5,5 мм. Термопару устанавливали на трехкоординатном сканирующем устройстве, с помощью которого осуществлялось ее перемещение в пространстве по заданной программе. Термопара помещалась перед фронтом пламени на высоте 30 мм над поверхностью образца и периодически опускалась со скоростью 2 мм/с до касания поверхности пластины (без риска деформации, что обеспечивалось ее конструкцией). Интервал по оси x между отдельными проходами термопары составлял примерно 1,5 мм. Диапазон движения термопары вниз постепенно увеличивался с шагом 1 мм по мере продвижения фронта пламени. Это требовалось для того, чтобы термопара касалась поверхности горящего полимера, положение которой смещалось в результате выгорания образца. Поправка на радиационные потери тепла термопарой рассчитывалась по формуле Каскана [27]. Величина радиационной поправки для измеренной в эксперименте температуры пламени, равной 1400 °C, составила 160 °C, погрешность измерения температуры — ± 50 °C. Запись показаний всех термопар и электронных весов проводилась с помощью многоканального АЦП (Е14-140-М) и синхронизировалась с видеозаписью, что позволило измерить градиент температуры в газовой фазе вблизи поверхности пластины ПММА. Аналогичная методика использовалась ранее Сингхом и

Голлнером для определения плотности кондуктивного потока тепла для горящих образцов ПММА [22].

Отбор пробы из пламени для измерения его химической структуры осуществлялся с помощью кварцевого конического микрозонда с диаметром отверстия 60 мкм и внутренним углом раствора 20°. Микрозонд устанавливали на аналогичном трехкоординатном устройстве для сканирования в разных областях пламени. Отобранная микрозондом проба поступала в режиме молекулярного натекания в ионный источник масс-спектрометрического комплекса Hiden HPR-60 для последующего анализа. В случае горизонтального расположения пламени проводилась его пространственная стабилизация с целью повысить точность измерения профилей концентраций. Для этого образец ПММА устанавливали на платформу, которая перемещалась в горизонтальном направлении, противоположном направлению распространения пламени, со скоростью, равной скорости его распространения по поверхности горючего. Для всех идентифицированных в пламени веществ (O_2 , N_2 , этилен C_2H_4 , CO_2 , H_2O , пропилен C_3H_6 , CO , метилметакрилат $\text{C}_5\text{H}_8\text{O}_2$) были проведены калибровочные эксперименты и определены калибровочные коэффициенты относительно азота (N_2). Процедура определения мольных долей была описана ранее в работе [28]. Погрешность измерения мольных долей составила 10–15 % для всех соединений, кроме паров воды, для которых она равна 20 %.

2. Математическая модель

2.1. Горизонтальное распространение пламени

Течение многокомпонентного реагирующего газа описывается следующими уравнениями:

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{\partial \rho u_j}{\partial x_j} = 0; \quad (1)$$

$$\begin{aligned} \rho \frac{\partial u_i}{\partial t} + \rho u_j \frac{\partial u_i}{\partial x_j} = \\ = - \frac{\partial p}{\partial x_i} + \frac{\partial}{\partial x_j} \mu \frac{\partial u_i}{\partial x_j} + (\rho_a - \rho) g_i; \end{aligned} \quad (2)$$

$$\rho C \frac{\partial T}{\partial t} + \rho u_j C \frac{\partial T}{\partial x_j} = \frac{\partial}{\partial x_j} \lambda \frac{\partial T}{\partial x_j} + \rho W Q - \frac{\partial q_j^r}{\partial x_j}; \quad (3)$$

$$\rho \frac{\partial Y_i}{\partial t} + \rho u_j \frac{\partial Y_i}{\partial x_j} = \frac{\partial}{\partial x_j} \rho D \frac{\partial Y_i}{\partial x_j} + v_i \rho W; \quad (4)$$

$$p = \rho R T, \quad (5)$$

где ρ , ρ_a — плотность соответственно газа и окружающей среды, кг/м^3 ;

u_j , u_i — скорость, м/с ;

x_j , x_i — координата вдоль поверхности полимера, м ;

μ — динамическая вязкость, кг·с/м²;
 g_i — ускорение свободного падения, м/с²;
 C — теплоемкость, Дж/(кг·К);
 T — температура, К;
 λ — теплопроводность, Вт/(м·К);
 W — скорость реакции, 1/с;
 Q — удельное тепловыделение, Дж/кг;
 q_j^r — плотность радиационного теплового потока, Вт/м²;
 Y_i — массовая концентрация i -го компонента смеси;
 D — коэффициент диффузии, м²/с;
 ν_i — стехиометрический коэффициент;
 p — давление, Па;
 R — удельная газовая постоянная, Дж/(кг·К).

В рассматриваемую здесь двухмерную модель входят составляющие вектора скорости $i = \{x, y\}$, массовые концентрации компонентов смеси $i = \{O, F, P\}$, где O — окислитель, F — горючее, P — продукты реакции горения. Молекулярная вязкость полагается одинаковой для всех компонентов и равной ее температурной зависимости для воздуха. Вклады диффузионного теплопереноса и термодиффузии полагаются малыми и не учитываются [9, 10]. Коэффициент диффузии компонентов газовой смеси определяется через их теплопроводность $(\rho D)_i = \lambda_i / (C_i Le_i)$ (где Le_i — число Льюиса). Эффективные коэффициенты диффузии, теплопроводности и теплоемкости для газовой смеси рассчитываются как $\rho D = \sum X_i (\rho D)_i$, $\lambda = \sum X_i \lambda_i$, $C = \sum Y_i C_i$ (где X_i и Y_i — объемные и массовые концентрации i -го компонента смеси соответственно). Теплопроводность и теплоемкость компонентов газовой смеси определяются по данным [29]. Радиационная составляющая $\partial q_j^r / \partial x_j$ (последнее слагаемое уравнения (3)) рассчитывается по модели сферических аппроксимаций P1 [30], для которой средний коэффициент поглощения смеси определяется как $K_p = \sum_i K_{p,i}(T) X_i$ [31, 32].

Для полимерного горючего рассматривается уравнение сохранения энергии

$$\rho_s C_s \frac{\partial T_s}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x_j} \lambda_s \frac{\partial T_s}{\partial x_j} + \rho_s W_s Q_s. \quad (6)$$

Процессы окисления газифицированного горючего и пиролиза горючего материала описываются одностадийными макрореакциями:

$$W = k_g Y_F Y_O \exp(-E_g / (R_0 T)); \quad (7)$$

$$W_s = k_s \exp(-E_s / (R_0 T)), \quad (8)$$

где k — предэкспоненциальный множитель, с⁻¹;
 E — энергия активации константы скорости реакции, Дж/моль;
 R_0 — универсальная газовая постоянная, Дж/(моль·К).

Вид граничных условий для схемы расчетной области является общепринятым [9, 10] для сопря-

Таблица 1. Теплофизические и кинетические параметры ПММА

Table 1. Thermophysical and kinetic parameters of PMMA

Параметр Parameter	Значение Value	Источник Reference
ρ_s , кг/м ³ / ρ_s , kg/m ³	1200	[9, 29]
C_s , Дж/(кг·К) / C_s , J/(kg·K)	1466,5	
λ_s , Вт/(м·К) / λ_s , W/(m·K)	0,19	
Q_s , Дж/кг / Q_s , J/kg	$-1 \cdot 10^6$	
Q_g , Дж/кг / Q_g , J/kg	$2,5 \cdot 10^7$	
k_s , с ⁻¹ / k_s , sec ⁻¹	$2,82 \cdot 10^9$	Подбирался
E_s , Дж/моль / E_s , J/mole	129890	
k_g , с ⁻¹ / k_g , sec ⁻¹	$1 \cdot 10^{10}$	
E_g , Дж/моль / E_g , J/mole	90000	
ν_F	1,0	
ν_O	1,9	[9, 29]

женной модели тепломассопереноса в реагирующей гетерогенной системе.

Интегрирование уравнений осуществляется методом конечных объемов с использованием алгоритма SIMPLE [33] для расчета поля течения в естественных переменных.

Исследуется распространение пламени по поверхности ПММА. Свойства исследуемого материала сведены в табл. 1.

2.2. Распространение пламени сверху вниз

Программный пакет Fire Dynamics Simulator (FDS) использовался для моделирования распространения пламени сверху вниз по вертикально ориентированному образцу. В данной реализации акцент делается на перенос дыма и тепла при распространении пламени. Моделирование течения газа проводилось с помощью метода крупных вихрей (LES). Для газовой фазы решались уравнения сохранения массы, импульсов, веществ и сохранения энергии [34], для твердой — уравнения сохранения энергии. Натяжение, вызванное потоком (гравитационные эффекты), было включено в уравнения сохранения импульса. Однако конвективный перенос газа не рассматривался. Модель пиролиза представлена как одностадийный процесс (эквивалентный сублимации). В данную методологию FDS включен процесс газификации/сублимации с использованием подхода, применяемого для испарения жидкого топлива, в котором заложены скрытая теплота испарения и точка кипения. В данном случае была задана температура пиролиза (250 °С) и его энтальпия (1620 кДж/кг [35]). Удельная теплоемкость равна 2,1 кДж/(кг·К), коэффициент теплопроводности — 0,26 Вт/(м·К) [35]. Коэффициент излучения составил 0,85, коэффициент абсорбции — 2700 м⁻¹ [34]. Исходя из этого,

рассчитывалась мольная доля паров топлива на поверхности горючего. Для оценки массовой скорости газификации использовалось уравнение диффузии Стефана, в которое входит коэффициент массопереноса, являющийся функцией чисел Шервуда и Рейнольдса [34].

Вычислительная область (домен), будучи симметричной относительно толщины, включает только половину образца. Левая часть границы симметричная. Производная первого порядка всех переменных (кроме компоненты скорости по оси x) устанавливается равной нулю, а скорость составляющей по оси x равна нулю. Верхняя и правая границы являются открытыми границами, через которые продукты сгорания могут покидать домен или в него может попадать атмосферный воздух. Нижняя часть домена представляет собой инертную стенку, которая определяется как адиабатическая для температуры, нулевой диффузионный поток для соединений и отсутствие скачка скоростей. Моделирование проводилось для двух толщин — 1,6 и 5,0 мм. Длина образца составляла 150 мм, ширина — 100 мм.

Для данного расчетного домена использовалась многоблочная структурированная сетка. Для распространения пламени вниз по пластине ПММА ее верхняя часть на высоте 60 мм была снабжена тонкой сеткой, а нижняя — грубой сеткой. Для исследования устойчивого распространения пламени в этой задаче данный подход представляется экономичным. Для зажигания использовались нагревательные поверхности, настроенные на диапазон температур от 1000 до 1200 °C, чтобы обеспечить зажигание образца. Как только образец загорался, что регистрировалось по температурным контурам, горячие пластины удалялись из домена.

3. Результаты

3.1. Эксперимент

В табл. 2 представлены результаты измерения скорости распространения пламени u_f , скорости потери массы $U_{\text{мас}}$, длины зоны пиролиза L и средней скорости пиролиза массы $\dot{m}$, определенных для исследуемых пластин ПММА. Средняя скорость пиролиза массы рассчитывалась как скорость потери массы, деленная на площадь зоны пиролиза. Разброс значений скорости распространения пламени u_f составил 10 %.

На рис. 2 приведено пространственное распределение температуры в газовой фазе для обоих случаев, а также контуры поперечного сечения погашенных образцов, демонстрирующие зависимость толщины несгоревшей части образца от расстояния до фронта пламени. Положение передней кромки пламени в газовой фазе примерно совпадает с фронтом пламени в конденсированной фазе, т. е. в полимере. Из пространственных распределений температуры, показанных на рис. 2, видно, что флуктуации

Таблица 2. Скорость распространения пламени, скорость потери массы, длина зоны пиролиза и средняя скорость пиролиза, измеренные для образцов ПММА

Table 2. The flame propagation rate, the mass loss rate, the pyrolysis zone length and the average rate of pyrolysis measured for PMMA samples

Ориентация образца Specimen orientation	u_f , мм/с u_f , mm/sec	$U_{\text{мас}}$, г/с $U_{\text{мас}}$, g/sec	L , см L , cm	$\dot{m}$, г/(с·см ²) $\dot{m}$, g/(sec·cm ²)
Горизонтальная Horizontally	0,090	0,045	5,2	10^{-3}
Вертикальная Vertically	0,066	0,037	0,8	$2,3 \cdot 10^{-3}$

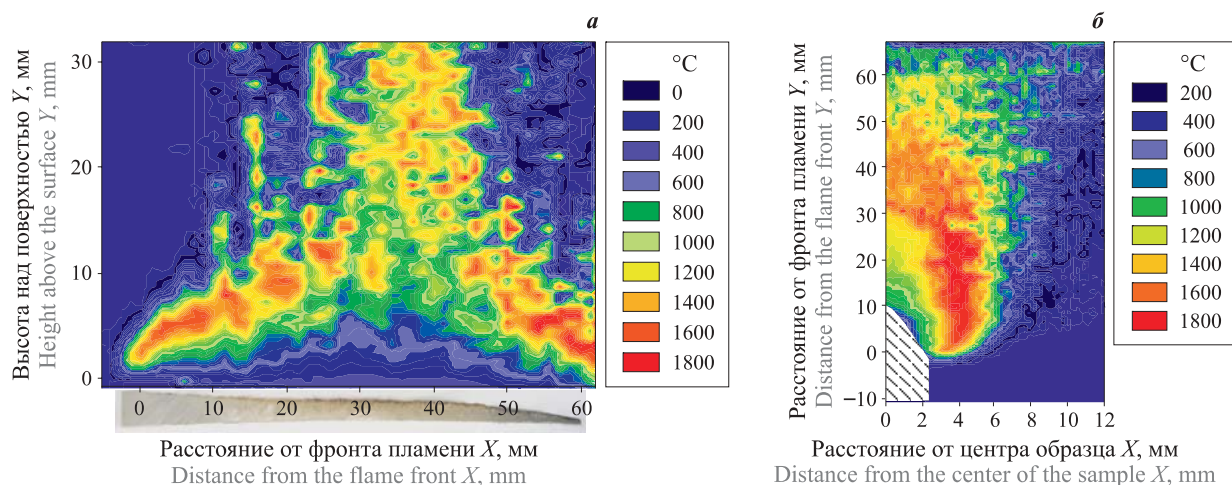


Рис. 2. Пространственное распределение температуры в пламени горящих образцов литого ПММА, ориентированного горизонтально (а) и вертикально (б): в нижней части — контур поперечного сечения погашенного образца

Fig. 2. Spatial distribution of the temperature in the flame of burning cast PMMA samples oriented horizontally (a) and vertically (b): the bottom of the figures shows the cross-section contour of the extinguished sample

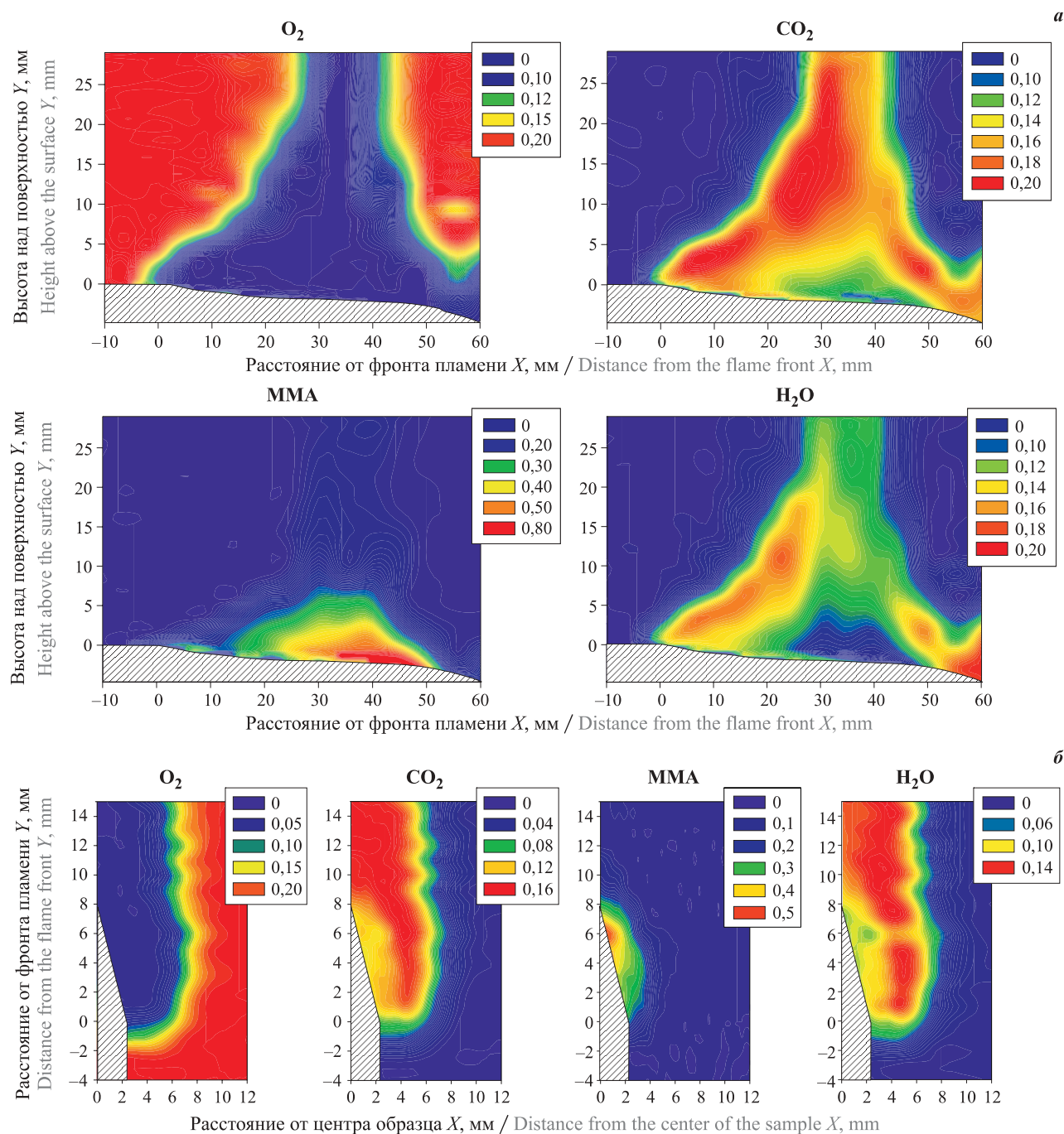


Рис. 3. Двумерное распределение концентраций основных веществ в пламени литого образца ПММА, ориентированного горизонтально (а) и вертикально (б)

Fig. 3. The two-dimensional distribution of the main species concentrations in the flame of cast PMMA sample oriented horizontally (a) and vertically (b)

температуры пламени усиливаются по мере увеличения высоты над поверхностью топлива. Это объясняется усилением турбулентности потока газа вследствие конвекции горячих продуктов горения вверх.

На рис. 3 приведено пространственное распределение концентраций компонентов пламени, измеренных при горении пластины литого ПММА. В пламени было идентифицировано семь соединений: ММА, O₂, CO₂, H₂O, CO, N₂, C₂H₄ (этилен), C₃H₆ (пропилен),

последние четыре из которых на графиках не приведены.

Измеренные профили температуры вблизи поверхности горения (рис. 4) были использованы для расчета градиента температуры dT/dy (где y — координата по нормали к поверхности полимера) и для оценки плотности кондуктивного теплового потока $Q_{\text{кон}}$ в полимер из пламени при его распространении по горизонтально ориентированному образцу. Используя измеренные профили температуры в

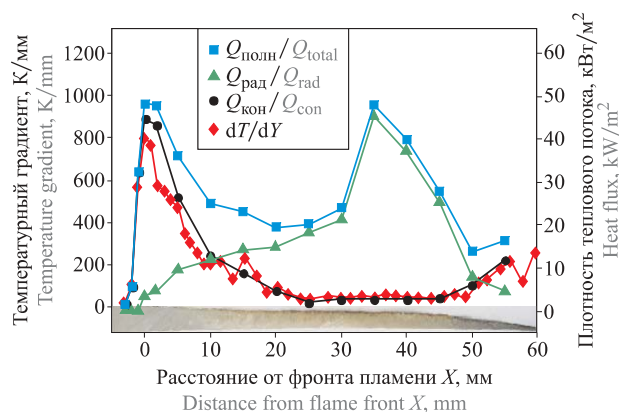


Рис. 4. Зависимость градиента температуры, плотности кондуктивного, радиационного и суммарного тепловых потоков на поверхность горения литого образца ПММА шириной 100 мм от расстояния до фронта пламени

Fig. 4. Dependence of temperature gradient, density of conductive, radiative and total heat fluxes to the burning surface of 100 mm wide cast PMMA sample on the distance to the flame front

газовой фазе и концентраций CO_2 , H_2O и ММА, рассчитывали плотность радиационного теплового потока от пламени к поверхности горючего с помощью оптически тонкой модели [36]. На рис. 4 также представлено распределение расчетной плотности кондуктивного ($Q_{\text{кон}}$), радиационного ($Q_{\text{рад}}$) и полного ($Q_{\text{полн}}$) тепловых потоков от пламени на поверхность литого образца ПММА вдоль горизонтальной поверхности горения. Можно отметить, что в отличие от кондуктивного теплового потока плотность радиационного теплового потока имеет низкое значение у передней кромки пламени и существенно возрастает с выгоранием образца и ростом размера зоны пламени.

3.2. Моделирование

Горизонтальное распространение пламени

На рис. 5 показаны профили температур по координате, нормальной к поверхности горения, при различных расстояниях от фронта пламени. Расчеты показали хорошее совпадение максимальной расчетной температуры с экспериментальной. Как можно видеть на рис. 5, на расстоянии 6,8 мм и менее от фронта пламени согласие градиентов температур и ширин зон удовлетворительное. Начиная с расстояния $X = 8,5$ мм от фронта пламени, экспериментальные данные показывают возникновение сильных флуктуаций на большой высоте (начиная с $Y = 15$ мм) от поверхности. Эти флуктуации хорошо видны и на рис. 2 (распределение температур). Здесь следует отметить, что рассматриваемая математическая модель представлена уравнениями для ламинарного режима распространения пламени, справедливость которых не может быть адекватно распространена

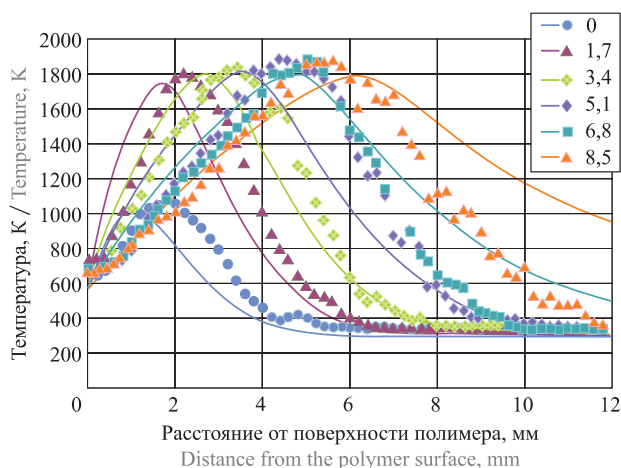


Рис. 5. Распределение температуры по нормали к поверхности в различных сечениях вдоль поверхности: точки — эксперимент, кривые — расчет; значения в легенде — расстояние от фронта пламени, мм; 0 — фронт пламени

Fig. 5. Temperature distribution along the normal to the surface in various cross-sections along the surface: dots is an experiment, curves is calculation; values in the legend are the distance from the flame front, mm; 0 is the flame front

на расчет характеристик в крупномасштабном факеле горизонтально распространяющегося пламени. Расчетное значение массовой скорости пиролиза составило 0,038 г/с, что близко к измеренному — 0,045 г/с.

На рис. 6 представлены теоретическое и экспериментальное распределения концентраций компонентов во фронте пламени ПММА (см. рис. 6,а) и на расстоянии 5 мм от фронта (см. рис. 6,б). Результаты моделирования по сопряженной модели отражают хорошее согласие для окислителя и горючего; расчетная концентрация продуктов горения показывает заниженное значение.

Вертикальное распространение пламени (сверху вниз)

На рис. 7 представлены расчетные и измеренные профили температуры вдоль оси y на разных расстояниях от центра образца толщиной 1,6 мм. Как видно из рис. 7, результаты эксперимента и моделирования хорошо совпадают как по положению максимума, так и по значению градиента. Расчетное значение скорости выгорания составляет 0,03 г/с (экспериментальное — 0,037 г/с), а скорости распространения пламени — 0,08 мм/с (экспериментальное — 0,066 мм/с).

В гетерогенном диффузионном пламени распределение расхода кислорода является очень важным. На рис. 8 представлены экспериментальные и расчетные профили мольных долей O_2 на разной высоте от фронта пламени при его распространении сверху вниз по поверхности ПММА толщиной 5 мм. Следует отметить хорошее согласие между моделью и экспериментом. Положение полного расхода и

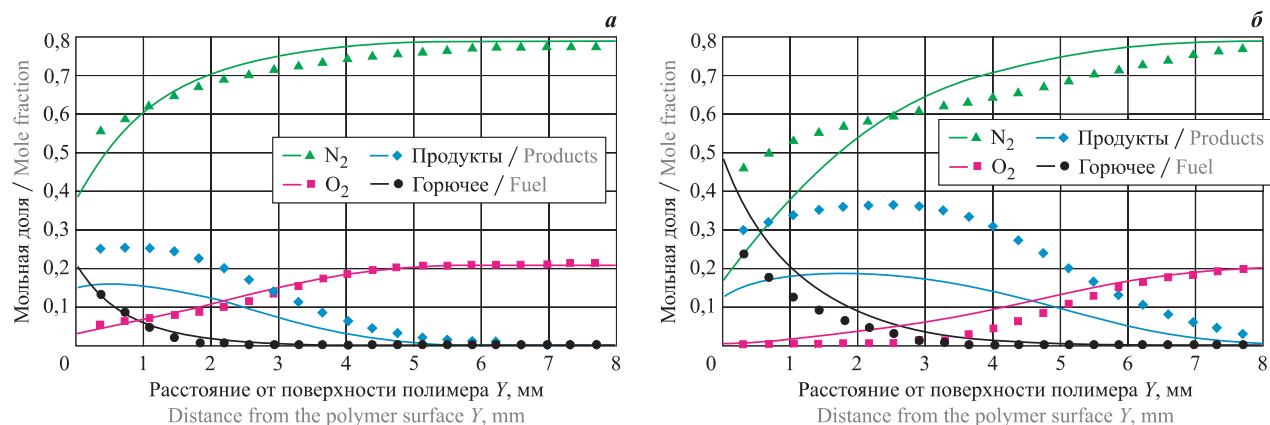


Рис. 6. Распределение концентраций по нормали к поверхности горения во фронте пламени (а) и на расстоянии 5 мм от него (б): точки — эксперимент, кривые — расчет; продукты горения — $\text{CO}_2 + \text{H}_2\text{O}$; горючее — $\text{MMA} + \text{C}_2\text{H}_4 + \text{C}_3\text{H}_6$

Fig. 6. Concentration distribution along the surface normal in various cross-sections along the surface at the flame front (a) and at a distance of 5 mm from the flame front (b): dots is an experiment, curves is calculation; products are $\text{CO}_2 + \text{H}_2\text{O}$; fuel is $\text{MMA} + \text{C}_2\text{H}_4 + \text{C}_3\text{H}_6$

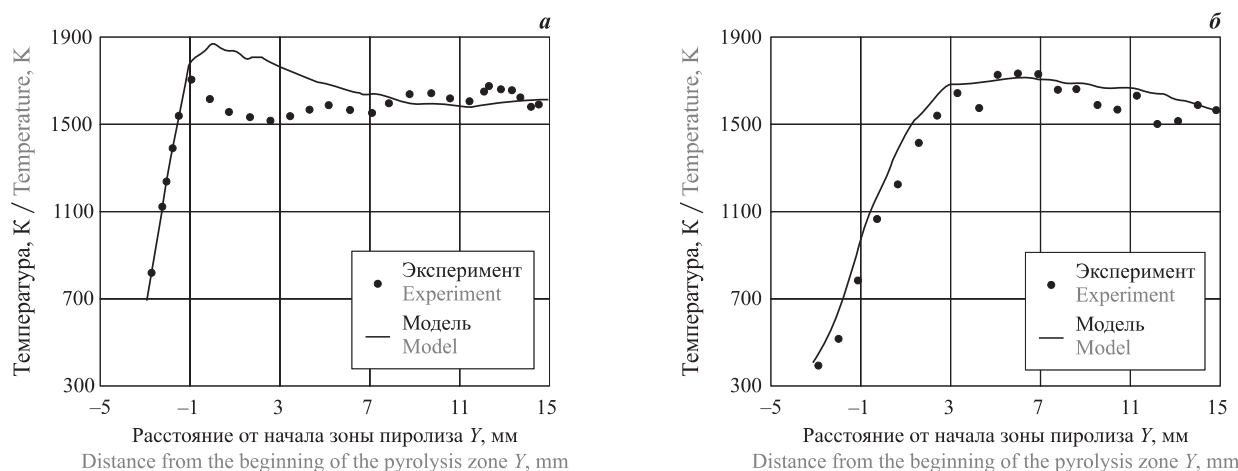


Рис. 7. Расчетные и измеренные профили температуры вдоль оси y на расстоянии X от центра образца 2 мм (а) и 4 мм (б) при распространении пламени сверху вниз; $X = 0$ мм соответствует центру образца толщиной 1,6 мм, $Y = 0$ мм — началу зоны пиролиза

Fig. 7. The calculated and measured temperature profiles along the y axis at distance X from the center of the sample 2 mm (a) and 4 mm (b) during the flame spread from top to bottom, where $X = 0$ mm corresponds to the center of the sample with a thickness of 1.6 mm, $Y = 0$ mm corresponds to the beginning of the pyrolysis zone

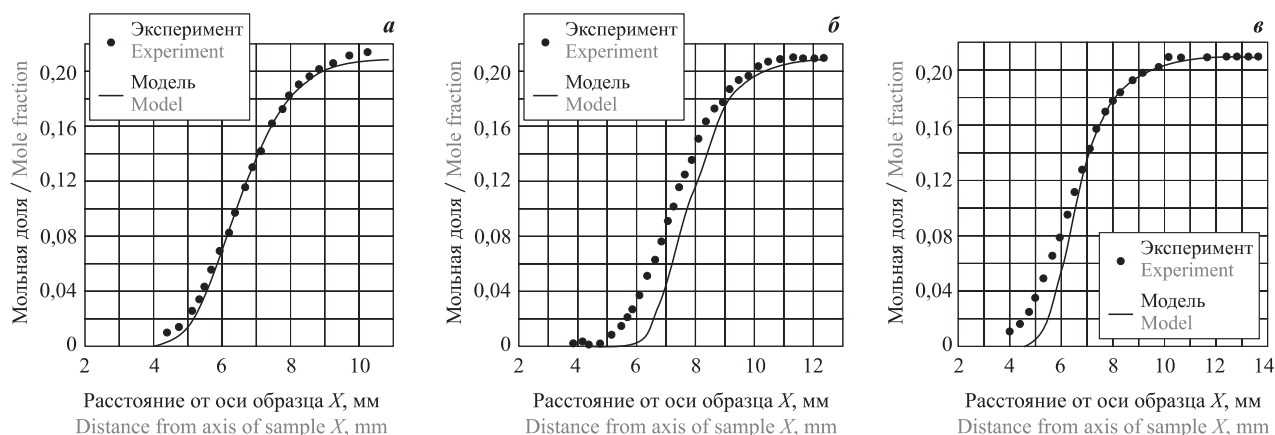


Рис. 8. Горизонтальные профили мольной доли кислорода на высоте от фронта пламени Y 2 мм (а), 6 мм (б) и 10 мм (в) при распространении пламени сверху вниз: $X = 0$ мм соответствует центру образца ПММА толщиной 5 мм

Fig. 8. Horizontal mole fraction profiles of oxygen at height from the flame front Y are 2 mm (a), 6 mm (b), and 10 mm (v) during the downward flame spread, where $X = 0$ mm corresponds to the center of the PMMA sample with a thickness of 5 mm

восстановления кислорода остается примерно одним и тем же.

Заключение

Проведено экспериментальное и численное исследование распространения пламени по поверхности горизонтально и вертикально ориентированных пластин ПММА. Были измерены следующие характеристики горения: массовая скорость выгорания, скорость распространения пламени по поверхности и длина зоны пиролиза. Определено пространственное распределение температуры в пламени. Впервые получено пространственное распределение мольной доли продуктов пиролиза ПММА и их

дальнейшего окисления. Полученные данные были использованы для расчета плотности кондуктивного и радиационного тепловых потоков от пламени к твердому топливу в зависимости от расстояния до фронта пламени. Установлено, что в отличие от кондуктивного теплового потока плотность радиационного теплового потока минимальна во фронте пламени и увеличивается по мере выгорания образца. Оценки полученных тепловых потоков показали, что уравнение теплового баланса с учетом ошибок измерения хорошо выполняется. Проведено численное моделирование распространения пламени по вертикальной и горизонтальной поверхностям ПММА.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Асеева Р. М., Заиков Г. Е. Горение полимерных материалов. — М.: Наука, 1981. — 280 с.
2. Khalturinskii N. A., Popova T. V., Berlin A. A. The combustion of polymers and the mechanism of action of fire-proofing agents // Russian Chemical Reviews. — 1984. — Vol. 53, Issue 2. — P. 197–209. DOI: 10.1070/rc1984v053n02abeh003041.
3. Берлин Ал. Ал. Горение полимеров и полимерные материалы пониженной горючести // Сороковский образовательный журнал. — 1996. — Т. 2, № 9. — С. 57–63.
4. Antonov A. V., Reshetnikov I. S., Khalturinskij N. A. Combustion of char-forming polymeric systems // Russian Chemical Reviews. — 1999. — Vol. 68, Issue 7. — P. 605–614. DOI: 10.1070/rc1999v068n07abeh000408.
5. Khalturinskii N. A., Rudakova T. A. Physical aspects of polymer combustion and the inhibition mechanism // Russian Journal of Physical Chemistry B. — 2008. — Vol. 2, Issue 3. — P. 480–490. DOI: 10.1134/s1990793108030238.
6. Константинова Н. И., Смирнов Н. В., Шебеко А. Ю. К вопросу об оценке эффективности огнезащиты полимерных материалов // Пожаровзрывобезопасность/Fire and Explosion Safety. — 2018. — Т. 27, № 7-8. — С. 32–42. DOI: 10.18322/PVB.2018.27.07-08.32-42.
7. Барботько С. Л., Вольный О. С., Вешкин Е. А., Гончаров В. А. Оценка огнестойкости материалов и конструктивных элементов для авиационной техники // Авиационная промышленность. — 2018. — № 2. — С. 63–67.
8. Frey A. E., T'ien J. S. A theory of flame spread over a solid fuel including finite-rate chemical kinetics // Combustion and Flame. — 1979. — Vol. 36. — P. 263–289. DOI: 10.1016/0010-2180(79)90064-6.
9. Wu K. K., Fan W. F., Chen C. H., Liou T. M., Pan I. J. Downward flame spread over a thick PMMA slab in an opposed flow environment: experiment and modeling // Combustion and Flame. — 2003. — Vol. 132, Issue 4. — P. 697–707. DOI: 10.1016/s0010-2180(02)00520-5.
10. Bhattacharjee S., King M. D., Paolini C. Structure of downward spreading flames: a comparison of numerical simulation, experimental results and a simplified parabolic theory // Combustion Theory and Modelling. — 2004. — Vol. 8, Issue 1. — P. 23–39. DOI: 10.1088/1364-7830/8/1/002.
11. Mao C.-P., Kodama H., Fernandez-Pello A. C. Convective structure of a diffusion flame over a flat combustible surface // Combustion and Flame. — 1984. — Vol. 57, Issue 2. — P. 209–236. DOI: 10.1016/0010-2180(84)90058-0.
12. Chen C.-H. A numerical study of flame spread and blowoff over a thermally-thin solid fuel in an opposed air flow // Combustion Science and Technology. — 1990. — Vol. 69, Issue 4-6. — P. 63–83. DOI: 10.1080/00102209008951603.
13. Kumar A., Shih H. Y., T'ien J. S. A comparison of extinction limits and spreading rates in opposed and concurrent spreading flames over thin solids // Combustion and Flame. — 2003. — Vol. 132, Issue 4. — P. 667–677. DOI: 10.1016/S0010-2180(02)00516-3.
14. Blasi C. D. Modeling and simulation of combustion processes for charring and non-charring solid fuels // Progress in Energy and Combustion Science. — 1993. — Vol. 19, Issue 1. — P. 71–104. DOI: 10.1016/0360-1285(93)90022-7.
15. 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. — P. 225–234. DOI: 10.1016/j.ijheatmasstransfer.2015.07.091.

16. *Fernandez-Pello A. C., Williams F. A.* Laminar flame spread over PMMA surfaces // Symposium (International) on Combustion. — 1975. — Vol. 15, Issue 1. — P. 217–231. DOI: 10.1016/s0082-0784(75)80299-2.
17. *Ray S. R., Fernandez-Pello A. C., Glassman I.* A study of the heat transfer mechanisms in horizontal flame propagation // Journal of Heat Transfer. — 1980. — Vol. 102, No. 2. — P. 357–363. DOI: 10.1115/1.3244288.
18. *Ito A., Kashiwagi T.* Characterization of flame spread over PMMA using holographic interferometry sample orientation effects // Combustion and Flame. — 1988. — Vol. 71, Issue 2. — P. 189–204. DOI: 10.1016/0010-2180(88)90007-7.
19. *Fernandez-Pello A. C., Ray S. R., Glassman I.* Flame spread in an opposed forced flow: the effect of ambient oxygen concentration // Symposium (International) on Combustion. — 1981. — Vol. 18, Issue 1. — P. 579–589. DOI: 10.1016/s0082-0784(81)80063-x.
20. *Jiang L., Miller C. H., Gollner M. J., Sun J.-H.* Sample width and thickness effects on horizontal flame spread over a thin PMMA surface // Proceedings of the Combustion Institute. — 2017. — Vol. 36, Issue 2. — P. 2987–2994. DOI: 10.1016/j.proci.2016.06.157.
21. *Singh A. V., Gollner M. J.* Estimation of local mass burning rates for steady laminar boundary layer diffusion flames // Proceedings of the Combustion Institute. — 2015. — Vol. 35, Issue 3. — P. 2527–2534. DOI: 10.1016/j.proci.2014.05.040.
22. *Singh A. V., Gollner M. J.* A methodology for estimation of local heat fluxes in steady laminar boundary layer diffusion flames // Combustion and Flame. — 2015. — Vol. 162, Issue 5. — P. 2214–2230. DOI: 10.1016/j.combustflame.2015.01.019.
23. *Gong J., Zhou X., Deng Z., Yang L.* Influences of low atmospheric pressure on downward flame spread over thick PMMA slabs at different altitudes // International Journal of Heat and Mass Transfer. — 2013. — Vol. 61. — P. 191–200. DOI: 10.1016/j.ijheatmasstransfer.2013.01.066.
24. *Ayani M. B., Esfahani J. A., Mehrabian R.* Downward flame spread over PMMA sheets in quiescent air: Experimental and theoretical studies // Fire Safety Journal. — 2006. — Vol. 41, Issue 2. — P. 164–169. DOI: 10.1016/j.firesaf.2005.12.003.
25. *Ito A., Kashiwagi T.* Temperature measurements in PMMA during downward flame spread in air using holographic interferometry // Symposium (International) on Combustion. — 1987. — Vol. 21, Issue 1. — P. 65–74. DOI: 10.1016/s0082-0784(88)80232-7.
26. *Bhattacharjee S., King M. D., Takahashi S., Nagumo T., Wakai K.* Downward flame spread over poly(methyl) methacrylate // Proceedings of the Combustion Institute. — 2000. — Vol. 28, Issue 2. — P. 2891–2897. DOI: 10.1016/s0082-0784(00)80713-4.
27. *Kaskan W. E.* The dependence of flame temperature on mass burning velocity // Symposium (International) on Combustion. — 1957. — Vol. 6, Issue 1. — P. 134–143. DOI: 10.1016/s0082-0784(57)80021-6.
28. *Korobeinichev O. P., Kuibida L. V., Paletsky A. A., Shmakov A. G.* Molecular-beam mass-spectrometry to ammonium dinitramide combustion chemistry studies // Journal of Propulsion and Power. — 1998. — Vol. 14, Issue 6. — P. 991–1000. DOI: 10.2514/2.5364.
29. *McBride B. J., Gordon S., Reno M. A.* Coefficients for calculating thermodynamic and transport properties of individual species // NASA Technical Memorandum 4513. — Washington : National Aeronautics and Space Administration, 1993. — 96 p.
30. *Modest M. F.* Radiative heat transfer. — London, New York : Academic Press, Elsevier Science, 2003. — 842 p.
31. *Zhang H., Modest M. F.* Evaluation of the Planck-mean absorption coefficients from HITRAN and HITEMP databases // Journal of Quantitative Spectroscopy and Radiative Transfer. — 2002. — Vol. 73, Issue 6. — P. 649–653. DOI: 10.1016/s0022-4073(01)00178-9.
32. *Park S. H., Stretton A. J., Tien C. L.* Infrared radiation properties of methyl methacrylate vapor // Combustion Science and Technology. — 1988. — Vol. 62, Issue 4-6. — P. 257–271. DOI: 10.1080/00102208808924012.
33. *Патанкар С.* Численные методы решения задач теплообмена и динамики жидкости / Пер. с англ. — М. : Энергоатомиздат. — 1984. — 152 с.
34. *McGrattan K., Hostikka S., McDermott R., Floyd J., Weinschenk C., Overholt K.* Fire Dynamics Simulator. Technical Reference Guide. Volume 1: Mathematical Model. — 6th ed. — Gaithersburg, Maryland : National Institute of Standards and Technology; Espoo : VTT Technical Research Centre of Finland, 2013. — 149 p.
35. *Ananth R., Ndubizu C. C., Tatem P. A.* Burning rate distributions boundary layer flow combustion of a PMMA plate in forced flow // Combustion and Flame. — 2003. — Vol. 135, Issue 1-2. — P. 35–55. DOI: 10.1016/s0010-2180(03)00143-3.

36. Yoshinaga K., Kobayashi H. Numerical study of radiation effects on polypropylene combustion using high-temperature oxidizer diluted with H₂O and CO₂ // *Journal of Thermal Science and Technology*. — 2008. — Vol. 3, Issue 2. — P. 167–178. DOI: 10.1299/jtst.3.167.

REFERENCES

1. R. M. Aseeva, G. E. Zaikov. *Goreniye polimernykh materialov* [Burning of polymeric materials]. Moscow, Nauka Publ., 1981. 280 p. (in Russian).
2. N. A. Khalturinskii, T. V. Popova, A. A. Berlin. The combustion of polymers and the mechanism of action of fire-proofing agents. *Russian Chemical Reviews*, 1984, vol. 53, issue 2, pp. 197–209. DOI: 10.1070/rc1984v053n02abeh003041.
3. Al. Al. Berlin. Combustion of polymers and polymer materials of reduced combustibility. *Sorosovskiy obrazovatel'nyy zhurnal / Soros Educational Journal*, 1996, vol. 2, no. 9, pp. 57–63 (in Russian).
4. A. V. Antonov, I. S. Reshetnikov, N. A. Khalturinskij. Combustion of char-forming polymeric systems. *Russian Chemical Reviews*, 1999, vol. 68, issue 7, pp. 605–614. DOI: 10.1070/rc1999v068n07abeh000408.
5. N. A. Khalturinskii, T. A. Rudakova. Physical aspects of polymer combustion and the inhibition mechanism. *Russian Journal of Physical Chemistry B*, 2008, vol. 2, issue 3, pp. 480–490. DOI: 10.1134/s1990793108030238.
6. N. I. Konstantinova, N. V. Smirnov, A. Yu. Shebeko. Revisiting the assessment of polymeric materials fire protection efficiency. *Pozharovzryvobezopasnost/Fire and Explosion Safety*, 2018, vol. 27, no. 7-8, pp. 32–42 (in Russian). DOI: 10.18322/PVB.2018.27.07-08.32-42.
7. S. L. Barbot'ko, O. S. Vol'niy, E. A. Veshkin, V. A. Goncharov. Evaluation of fire-resistance of materials and structural components for aircraft equipment. *Aviatsionnaya promyshlennost / Aviation Industry*, 2018, no. 2, pp. 63–67 (in Russian).
8. A. E. Frey, J. S. T'ien. A theory of flame spread over a solid fuel including finite-rate chemical kinetics. *Combustion and Flame*, 1979, vol. 36, pp. 263–289. DOI: 10.1016/0010-2180(79)90064-6.
9. K. K. Wu, W. F. Fan, C. H. Chen, T. M. Liou, I. J. Pan. Downward flame spread over a thick PMMA slab in an opposed flow environment: experiment and modeling. *Combustion and Flame*, 2003, vol. 132, issue 4, pp. 697–707. DOI: 10.1016/s0010-2180(02)00520-5.
10. S. Bhattacharjee, M. D. King, C. Paolini. Structure of downward spreading flames: a comparison of numerical simulation, experimental results and a simplified parabolic theory. *Combustion Theory and Modeling*, 2004, vol. 8, issue 1, pp. 23–39. DOI: 10.1088/1364-7830/8/1/002.
11. C.-P. Mao, H. Kodama, A. C. Fernandez-Pello. Convective structure of a diffusion flame over a flat combustible surface. *Combustion and Flame*, 1984, vol. 57, issue 2, pp. 209–236. DOI: 10.1016/0010-2180(84)90058-0.
12. C.-H. Chen. A numerical study of flame spread and blowoff over a thermally-thin solid fuel in an opposed air flow. *Combustion Science and Technology*, 1990, vol. 69, issue 4-6, pp. 63–83. DOI: 10.1080/00102209008951603.
13. A. Kumar, H. Y. Shih, J. S. T'ien. A comparison of extinction limits and spreading rates in opposed and concurrent spreading flames over thin solids. *Combustion and Flame*, 2003, vol. 132, issue 4, pp. 667–677. DOI: 10.1016/S0010-2180(02)00516-3.
14. C. D. Blasi. Modeling and simulation of combustion processes for charring and non-charring solid fuels. *Progress in Energy and Combustion Science*, 1993, vol. 19, issue 1, pp. 71–104. DOI: 10.1016/0360-1285(93)90022-7.
15. J. Gong, X. Zhou, J. Li, L. Yang. 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.
16. A. C. Fernandez-Pello, F. A. Williams. Laminar flame spread over PMMA surfaces. *Symposium (International) on Combustion*, 1975, vol. 15, issue 1, pp. 217–231. DOI: 10.1016/s0082-0784(75)80299-2.
17. S. R. Ray, A. C. Fernandez-Pello, I. Glassman. A study of the heat transfer mechanisms in horizontal flame propagation. *Journal of Heat Transfer*, 1980, vol. 102, no. 2, pp. 357–363. DOI: 10.1115/1.3244288.
18. A. Ito, T. Kashiwagi. Characterization of flame spread over PMMA using holographic interferometry sample orientation effects. *Combustion and Flame*, 1988, vol. 71, issue 2, pp. 189–204. DOI: 10.1016/0010-2180(88)90007-7.
19. A. C. Fernandez-Pello, S. R. Ray, I. Glassman. Flame spread in an opposed forced flow: the effect of ambient oxygen concentration. *Symposium (International) on Combustion*, 1981, vol. 18, issue 1, pp. 579–589. DOI: 10.1016/s0082-0784(81)80063-x.

20. L. Jiang, C. H. Miller, M. J. Gollner, J.-H. Sun. Sample width and thickness effects on horizontal flame spread over a thin PMMA surface. *Proceedings of the Combustion Institute*, 2017, vol. 36, issue 2, pp. 2987–2994. DOI: 10.1016/j.proci.2016.06.157.
21. A. V. Singh, M. J. Gollner. Estimation of local mass burning rates for steady laminar boundary layer diffusion flames. *Proceedings of the Combustion Institute*, 2015, vol. 35, issue 3, pp. 2527–2534. DOI: 10.1016/j.proci.2014.05.040.
22. A. V. Singh, M. J. Gollner. A methodology for estimation of local heat fluxes in steady laminar boundary layer diffusion flames. *Combustion and Flame*, 2015, vol. 162, issue 5, pp. 2214–2230. DOI: 10.1016/j.combustflame.2015.01.019.
23. J. Gong, X. Zhou, Z. Deng, L. Yang. Influences of low atmospheric pressure on downward flame spread over thick PMMA slabs at different altitudes. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 2013, vol. 61, pp. 191–200. DOI: 10.1016/j.ijheatmasstransfer.2013.01.066.
24. M. B. Ayani, J. A. Esfahani, R. Mehrabian. Downward flame spread over PMMA sheets in quiescent air: Experimental and theoretical studies. *Fire Safety Journal*, 2006, vol. 41, issue 2, pp. 164–169. DOI: 10.1016/j.firesaf.2005.12.003.
25. A. Ito, T. Kashiwagi. Temperature measurements in PMMA during downward flame spread in air using holographic interferometry. *Symposium (International) on Combustion*, 1987, vol. 21, issue 1, pp. 65–74. DOI: 10.1016/s0082-0784(88)80232-7.
26. S. Bhattacharjee, M. D. King, S. Takahashi, T. Nagumo, K. Wakai. Downward flame spread over poly-(methyl)methacrylate. *Proceedings of the Combustion Institute*, 2000, vol. 28, issue 2, pp. 2891–2897. DOI: 10.1016/s0082-0784(00)80713-4.
27. W. E. Kaskan. The dependence of flame temperature on mass burning velocity. *Symposium (International) on Combustion*, 1957, vol. 6, issue 1, pp. 134–143. DOI: 10.1016/s0082-0784(57)80021-6.
28. O. P. Korobeinichev, L. V. Kuibida, A. A. Paletsky, A. G. Shmakov. Molecular-beam mass-spectrometry to ammonium dinitramide combustion chemistry. *Journal of Propulsion and Power*, 1998, vol. 14, issue 6, pp. 991–1000. DOI: 10.2514/2.5364.
29. B. J. McBride, S. Gordon, M. A. Reno. Coefficients for calculating thermodynamic and transport properties of individual species. *NASA Technical Memorandum 4513*. Washington, National Aeronautics and Space Administration, 1993. 96 p.
30. M. F. Modest. *Radiative heat transfer*. London, New York, Academic Press, Elsevier Science, 2003. 842 p.
31. H. Zhang, M. F. Modest. Evaluation of the Planck-mean absorption coefficients from HITRAN and HITEMP databases. *Journal of Quantitative Spectroscopy and Radiative Transfer*, 2002, vol. 73, issue 6, pp. 649–653. DOI: 10.1016/s0022-4073(01)00178-9.
32. S. H. Park, A. J. Stretton, C. L. Tien. Infrared radiation properties of methyl methacrylate vapor. *Combustion Science and Technology*, 1988, vol. 62, issue 4–6, pp. 257–271. DOI: 10.1080/00102208808924012.
33. S. V. Patankar. *Numerical heat transfer and fluid flow*. McGraw-Hill, Hemisphere Publishing Corporation, 1980. 197 p. (Russ. ed.: S. Patankar. Численные методы решения задач теплообмена и динамики жидкости. Moscow, Energoatomizdat, 1984. 152 p.).
34. K. McGrattan, S. Hostikka, R. McDermott, J. Floyd, C. Weinschenk, K. Overholt. *Fire Dynamics Simulator. Technical Reference Guide. Volume 1: Mathematical Model*. 6th ed. Gaithersburg, Maryland, National Institute of Standards and Technology, and Espoo, VTT Technical Research Centre of Finland, 2013. 149 p.
35. R. Ananth, C. C. Ndubizu, P. A. Tatem. Burning rate distributions boundary layer flow combustion of a PMMA plate in forced flow. *Combustion and Flame*, 2003, vol. 135, issue 1–2, pp. 35–55. DOI: 10.1016/s0010-2180(03)00143-3.
36. K. Yoshinaga, H. Kobayashi. Numerical study of radiation effects on polypropylene combustion using high-temperature oxidizer diluted with H₂O and CO₂. *Journal of Thermal Science and Technology*, 2008, vol. 3, issue 2, pp. 167–178. DOI: 10.1299/jtst.3.167.

Поступила 29.05.2019; после доработки 22.06.2019; принята к публикации 26.06.2019
Received 29 May 2019; received in revised form 22 June 2019; accepted 26 June 2019

Информация об авторах

КОРОБЕЙНИЧЕВ Олег Павлович, д-р физ.-мат. наук, профессор, главный научный сотрудник, Институт химической кинетики и горения им. В. В. Воеводского СО РАН, г. Новосибирск, Российская Федерация; ORCID: 0000-0001-9122-4293; Researcher ID (WoS): G-2356-2016; Author ID (Scopus): 7005822429; e-mail: korobein@kinetics.nsc.ru

Information about the authors

Oleg P. KOROBEINICHEV, Dr. Sci. (Phys.-Math.), Professor, Chief Researcher, Voevodsky Institute of Chemical Kinetics and Combustion SB RAS, Novosibirsk, Russian Federation; ORCID: 0000-0001-9122-4293; Researcher ID (WoS): G-2356-2016; Author ID (Scopus): 7005822429; e-mail: korobein@kinetics.nsc.ru

ГЕРАСИМОВ Илья Евгеньевич, канд. физ.-мат. наук, научный сотрудник, Институт химической кинетики и горения им. В. В. Воеводского СО РАН, г. Новосибирск, Российская Федерация; ORCID: 0000-0002-7096-9787; Researcher ID (WoS): T-3223-2019; Author ID (Scopus): 36970477900

ГОНЧИКЖАПОВ Мунко Баторович, канд. физ.-мат. наук, научный сотрудник, Институт химической кинетики и горения им. В. В. Воеводского СО РАН, г. Новосибирск, Российская Федерация; ORCID: 0000-0002-7773-047X; Researcher ID (WoS): B-1185-2014; Author ID (Scopus): 55512248600

ТЕРЕЩЕНКО Александр Георгиевич, канд. физ.-мат. наук, старший научный сотрудник, Институт химической кинетики и горения им. В. В. Воеводского СО РАН, г. Новосибирск, Российская Федерация; ORCID: 0000-0002-9761-5444; Researcher ID (WoS): T-3237-2019; Author ID (Scopus): 7006510382

ГЛАЗНЕВ Роман Кириллович, студент, Новосибирский государственный университет, г. Новосибирск, Российская Федерация; ORCID: 0000-0003-0549-3222; Researcher ID (WoS): T-3227-2019; Author ID (Scopus): 57204631256

ТРУБАЧЕВ Станислав Альбертович, аспирант, Новосибирский государственный университет, г. Новосибирск, Российская Федерация; ORCID: 0000-0001-7923-8318; Researcher ID (WoS): T-3224-2019; Author ID (Scopus): 57198490232

ШМАКОВ Андрей Геннадьевич, канд. хим. наук, заведующий лабораторией, Институт химической кинетики и горения им. В. В. Воеводского СО РАН, г. Новосибирск, Российская Федерация; ORCID: 0000-0001-6810-7638; Researcher ID (WoS): A-9996-2014; Author ID (Scopus): 7006640724

ПАЛЕЦКИЙ Александр Анатольевич, д-р физ.-мат. наук, ведущий научный сотрудник, Институт химической кинетики и горения им. В. В. Воеводского СО РАН, г. Новосибирск, Российская Федерация; ORCID: 0000-0003-2715-8484; Researcher ID (WoS): B-1171-2014; Author ID (Scopus): 6602774865

КАРПОВ Александр Иванович, д-р физ.-мат. наук, профессор, заведующий лабораторией, Институт механики УрО РАН, г. Ижевск, Российская Федерация; ORCID: 0000-0001-8380-1599; Researcher ID (WoS): K-4565-2012; Author ID (Scopus): 57197866252

ШАКЛЕИН Артем Андреевич, канд. физ.-мат. наук, научный сотрудник, Институт механики УрО РАН, г. Ижевск, Российская Федерация; ORCID: 0000-0002-3603-4443; Researcher ID (WoS): D-4858-2019; Author ID (Scopus): 57204349538

КУМАР Амит, PhD, профессор кафедры аэрокосмических исследований, Индийский институт технологии Мадрас, г. Ченнай, Индия; ORCID: 0000-0003-3654-6008; Researcher ID (WoS): D-4250-2014; Author ID (Scopus): 36111220300

РАГХАВАН Васудеван, PhD, профессор кафедры аэрокосмических исследований, Индийский институт технологии Мадрас, г. Ченнай, Индия; ORCID: 0000-0002-6480-613X; Researcher ID (WoS): C-7443-2009; Author ID (Scopus): 13608408600

Илья Е. GERASIMOV, Cand. Sci. (Phys.-Math.), Researcher, Voevodsky Institute of Chemical Kinetics and Combustion Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences, Novosibirsk, Russian Federation; ORCID: 0000-0002-7096-978; Researcher ID (WoS): T-3223-2019; Author ID (Scopus): 36970477900

Munko B. GONCHIKZHAPOV, Cand. Sci. (Phys.-Math.), Researcher, Voevodsky Institute of Chemical Kinetics and Combustion SB RAS, Novosibirsk, Russian Federation; ORCID: 0000-0002-7773-047X; Researcher ID (WoS): B-1185-2014; Author ID (Scopus): 55512248600

Aleksander G. TERESHCHENKO, Cand. Sci. (Phys.-Math.), Senior Researcher, Voevodsky Institute of Chemical Kinetics and Combustion SB RAS, Novosibirsk, Russian Federation; ORCID: 0000-0002-9761-5444; Researcher ID (WoS): T-3237-2019; Author ID (Scopus): 7006510382

Roman K. GLAZNEV, Student, Novosibirsk State University, Novosibirsk, Russian Federation; ORCID: 0000-0003-0549-3222; Researcher ID (WoS): T-3227-2019; Author ID (Scopus): 57204631256

Stanislav A. TRUBACHEV, Post Graduate Student, Novosibirsk State University, Novosibirsk, Russian Federation; ORCID: 0000-0001-7923-8318; Researcher ID (WoS): T-3224-2019; Author ID (Scopus): 57198490232

Andrey G. SHMAKOV, Cand. Sci. (Chem.), Head of the Laboratory, Voevodsky Institute of Chemical Kinetics and Combustion SB RAS, Novosibirsk, Russian Federation; ORCID: 0000-0001-6810-7638; Researcher ID (WoS): A-9996-2014; Author ID (Scopus): 7006640724

Aleksander A. PALETSKY, Dr. Sci. (Phys.-Math.), Leading Researcher, Voevodsky Institute of Chemical Kinetics and Combustion SB RAS, Novosibirsk, Russian Federation; ORCID: 0000-0003-2715-8484; Researcher ID (WoS): B-1171-2014; Author ID (Scopus): 6602774865

Aleksander I. KARPOV, Dr. Sci. (Phys.-Math.), Professor, Head of the Laboratory, Institute of Mechanics UB RAS, Izhevsk, Russian Federation; ORCID: 0000-0001-8380-1599; Researcher ID (WoS): K-4565-2012; Author ID (Scopus): 57197866252

Artem A. SHAKLEIN, Cand. Sci. (Phys.-Math.), Researcher, Institute of Mechanics UB RAS, Izhevsk, Russian Federation; ORCID: 0000-0002-3603-4443; Researcher ID (WoS): D-4858-2019; Author ID (Scopus): 57204349538

Amit KUMAR, PhD, Professor of Mechanical and Aerospace Department of Aerospace Engineering, Indian Institute of Technology Madras, Chennai, India; ORCID: 0000-0003-3654-6008; Researcher ID (WoS): D-4250-2014; Author ID (Scopus): 36111220300

Vasudevan RAGHAVAN, PhD, Associated Professor of Mechanical and Aerospace Department of Aerospace Engineering, Indian Institute of Technology Madras, Chennai, India; ORCID: 0000-0002-6480-613X; Researcher ID (WoS): C-7443-2009; Author ID (Scopus): 13608408600

<https://doi.org/10.18322/PVB.2019.28.04.29-41>

УДК 536.46

Численное моделирование распространения пламени по дискретной совокупности горючих материалов

© Е. С. Маркус[✉], А. Ю. Снегирев, Е. А. Кузнецов,
Л. Т. Танклевский, А. В. Аракчеев

Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого
(Россия, 195251, г. Санкт-Петербург, ул. Политехническая, 29)

РЕЗЮМЕ

Введение. Пожары на высокостеллажных складах с дискретным распределением пожарной нагрузки характеризуются стремительным развитием, трудно поддаются раннему обнаружению и тушению и приводят к существенному материальному ущербу. Цель данной работы — демонстрация применимости методики численного моделирования на основе тепловой модели воспламенения твердых горючих материалов для прогнозирования развития пожара на высокостеллажном складе.

Методика. Расчеты выполняются с использованием модели и кода FDS 6.6. В тепловой модели предполагается, что имеет место инертный нагрев материала до достижения критической температуры поверхности (температуры воспламенения) и последующее выгорание его с постоянной скоростью потери массы. Преимуществом тепловой модели пиролиза является ее простота и использование ограниченного числа модельных параметров: температуры воспламенения, удельной массовой скорости выгорания, времени выгорания материала и теплоты его газификации. Предлагаемая методика подбора указанных параметров основана на анализе литературных и экспериментальных данных. В статье приводится расчет развития пожара на трех- и пятиярусном стеллажах с 2 рядами картонных коробок (общее количество — $2 \times 4 \times 3 = 24$ и $2 \times 4 \times 5 = 40$ коробок); системы автоматического пожаротушения не активируются.

Результаты и обсуждение. Расчеты с использованием тепловой модели пиролиза позволяют воспроизвести сложную динамику развития пожара, включая распространение пламени вверх по боковым поверхностям и вдоль по горизонтальным поверхностям коробок. Приведены поля температуры и суммарного теплового потока на поверхностях коробок, температура и скорость газа внутри стеллажа. При увеличении количества ярусов с 3 до 5 наблюдается увеличение скорости роста мощности тепловыделения.

Выводы. Полученное согласие результатов расчета мощности тепловыделения с данными натурных испытаний показывает возможность использования тепловой модели пиролиза для прогнозирования динамики развития пожара на высокостеллажном складе. Рассматриваемая модель может быть использована при разных компоновках пожарной нагрузки и высотах перекрытия, а также при прогнозировании обнаружения пожара и динамики пожаротушения.

Ключевые слова: тепловая модель; распространение пламени; совместное моделирование; высокостеллажный склад; FDS.

Работа выполнена при частичной поддержке Российского научного фонда (проект № 16-49-02017) с использованием ресурсов Суперкомпьютерного центра “Политехнический” (СПБПУ).

Для цитирования: 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.

✉ Маркус Екатерина Сергеевна, e-mail: eksmarkus@gmail.com

Simulation of flame spread over discrete fire load

© Ekaterina S. Markus[✉], Alexander Yu. Snegirev, Egor A. Kuznetsov,
Leonid T. Tanklevskiy, Aleksandr V. Arakcheev

Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University (Polytechnicheskaya St., 29,
St. Petersburg, 195251, Russian Federation)

ABSTRACT

Introduction. Fires at high-rack storages with a discrete fire load develop dramatically fast, while fire detection and suppression systems might activate too late, which leads to significant property damage. The objective of this work is to demonstrate applicability of the thermal pyrolysis model in predictions of fire development in high-rack storage facilities.

Methods. The simulations are performed using FDS 6.6. In the thermal pyrolysis model, the solid material is exposed to inert heating until its surface temperature reaches the ignition temperature; combustible material then

ignites and burns at a prescribed burning rate. The advantage of this approach is its simplicity and a limited number of input parameters, which include ignition temperature, mass loss rate per unit area, burn-out time and heat of gasification. The model parameters selection procedure is based on literature and experimental data. In this work, FDS simulations are performed for 3- and 5-tier high racks with 2 rows of cardboard boxes ($2 \times 4 \times 3 = 24$ and $2 \times 4 \times 5 = 40$ boxes in total). Fire suppression systems are not activated.

Results and discussions. Simulations results show that high-rack storage fire dynamics can be replicated using thermal pyrolysis model provided that model parameters are properly selected. Fire growth mechanisms include upward and horizontal flame spread over the combustible surfaces. Net heat flux and surface temperature distributions, in-rack gas velocity and temperature are also reported. When number of tiers is increased to 5 the heat release rate grows faster compared to the 3-tier case.

Conclusions. Thermal pyrolysis model enables reasonable replication of high-rack storage fire dynamics, which is proven by comparison with the full-scale experimental data. The model could be used to simulate fire dynamics in rack storages of different configurations at different ceiling heights, with the purpose of predicting fire detection and the performance of fire suppression systems.

Keywords: thermal theory; flame spread; coupled simulations; high-rack storage; FDS.

This work was supported in part by the Russian Science Foundation (project No. 16-49-02017) using the resources of the Polytechnic Super Computer Center (Saint Petersburg).

For citation: E. S. Markus, A. Yu. Snegirev, E. A. Kuznetsov, L. T. Tanklevskiy, A. V. Arakcheev. Simulation of flame spread over discrete fire load. *Pozharovzryvbezopasnost/Fire and Explosion Safety*, 2019, vol. 28, no. 4, pp. 29–41 (in Russian). DOI: 10.18322/PVB.2019.28.04.29-41.

✉ Ekaterina Sergeevna Markus, e-mail: eksmarkus@gmail.com

Введение

Пожары на высокостеллажных складах характеризуются стремительным развитием, трудно поддаются раннему обнаружению и тушению и приводят к существенному материальному ущербу. Динамика развития пожара на таких объектах определяется конфигурацией пожарной нагрузки. Поскольку горючие предметы упорядоченно расположены в непосредственной близости друг от друга, в случае возникновения очага пожара они быстро воспламеняются, а скорость распространения пламени оказывается очень высокой. Этому способствуют интенсивный лучистый теплоперенос внутри стеллажа и эффект дымовой трубы: горячие продукты сгорания отводятся через вертикальные проемы, а свежий воздух поступает через горизонтальные зазоры. Вследствие этого мощность тепловыделения может достигнуть нескольких десятков мегаватт в течение короткого промежутка времени.

В силу резкого роста мощности тепловыделения на ранних стадиях пожара, а также труднодоступности горящих поверхностей использование традиционных автоматических установок пожаротушения может оказаться неэффективным. В частности, грузы верхних ярусов могут экранировать зону горения от воды, поступающей из спринклерных оросителей, установленных под перекрытием. В этом случае для тушения пожара требуется существенно больше воды, чем при горизонтальном расположении пожарной нагрузки. Другим классическим подходом является установка дополнительных внутрестеллажных спринклеров и громоздких сплошных экранов, разделяющих стеллажи по вертикали на участки высотой менее 4 м каждый [1]. Однако эти решения не являются оптимальными,

поскольку требуют существенных материальных затрат на этапах проектирования, внедрения и обслуживания, и поэтому не в полной мере удовлетворяют потребителя. Возникает потребность в поиске нетрадиционных путей автоматической пожарной защиты — тушения или сдерживания развития пожара до прибытия пожарных подразделений.

Для того чтобы определить параметры возможных альтернативных систем пожаротушения, требуется провести несколько серий экспериментов при различных сценариях развития пожара с учетом описанной выше специфики. Однако очевидно, что экспериментальные исследования пожаров на высокостеллажных складах требуют существенных материальных и временных затрат. Это особенно характерно при высоте складирования более 10 м. Стоимость таких испытаний может достигать нескольких миллионов рублей. Кроме того, количество стендов, приспособленных для проведения натурных экспериментов, не только в России, но и в мире крайне ограничено. В связи с этим особую актуальность приобретает использование методов численного моделирования для описания процессов горения и тушения высокостеллажных складов.

Горение твердых горючих материалов в окислительной атмосфере сопровождается двумя процессами, существенно разными по своей природе: (1) газификацией пожарной нагрузки (пиролиз) и (2) турбулентным горением летучих при их смешении с воздухом. Двустороннее взаимодействие этих процессов обуславливает существование критических условий воспламенения и погасания пламени, а также распространения пламени по поверхности горючего материала. Воздействие огнетушащих веществ (газ, распыленная жидкость, порошок или их

комбинация) на газофазное пламя и (или) поверхность горючего материала порождает дополнительные виды взаимодействий и критических условий.

Традиционный подход к численному моделированию динамики развития пожара в помещении заключается в раздельном рассмотрении газификации пожарной нагрузки и турбулентного горения в газовой фазе. Такой подход лежит в основе концепции проектного пожара, в рамках которой тепловая мощность очага изменяется во времени по заранее заданному закону. Применительно к равномерному распределению пожарной нагрузки [1, 2] зависимость мощности тепловыделения от времени в условиях растущего пожара аппроксимируется квадратичной зависимостью (закон t^2). При этом ожидаемая скорость роста мощности тепловыделения выбирается на основании экспертных оценок.

Для развития пожара на высокостеллажном складе характерна гораздо более высокая, чем квадратичная, скорость роста мощности, зависящая не только от свойств и типа пожарной нагрузки, но и от способа зажигания. Экспериментальные данные показывают, что для таких объектов могут наблюдаться следующие зависимости скорости роста мощности тепловыделения: t^3 [3, 4]; $\exp(t)$ [5]; $\alpha \exp(\beta t)(a + bt)$ [6–8].

Учет перечисленных факторов в рамках концепции проектного пожара невозможен. Альтернативным подходом может стать технология совместного численного моделирования тепло- и массопереноса как в слое горючего материала, так и в газовой фазе, основанная на принципах вычислительной гидродинамики.

Наиболее полные современные модели для численных расчетов учитывают конечную скорость реакций пиролиза, а также изменение структуры материала (обугливание, вспучивание, расслоение). Примером является модель FireFOAM [9–13]. Такие модели формулируются и калибруются для конкретного вида пожарной нагрузки и требуют задания большого количества термохимических свойств и кинетических параметров, многие из которых остаются неизвестными для материалов, применяемых на практике.

В качестве альтернативы указанным моделям в наших работах [14–16] применяется упрощенный подход, основанный на тепловой модели воспламенения твердых горючих материалов. В тепловой модели предполагается, что имеет место инертный нагрев материала до достижения критической температуры поверхности (температуры воспламенения) и последующее выгорание его с постоянной скоростью потери массы. Тепловая модель применяется, в частности, в работе [16] для расчета времени задержки воспламенения. В работах [14, 15] описывается валидация тепловой модели с исполь-

зованием модели и кода FDS для сплошной и дискретной совокупности горючего материала. Преимущество рассматриваемого подхода заключается в том, что для него требуется ограниченное количество параметров.

Цель данной работы — демонстрация применимости методики совместного моделирования газификации пожарной нагрузки и турбулентного горения на основе упрощенной (тепловой) модели воспламенения твердых горючих материалов для численного моделирования развития пожара на высокостеллажном складе. В дальнейшем данная методика может быть использована для прогнозирования развития пожара на высокостеллажном складе в реалистичной крупномасштабной постановке, что даст возможность проведения сравнительного анализа систем автоматического пожаротушения таких объектов.

Для достижения указанной цели в настоящей работе выполняется апробация упрощенной (тепловой) модели пиролиза пожарной нагрузки при численном моделировании пожара на складе с высотой складирования до 8 м. Результаты расчетов сравниваются с экспериментальными данными, приведенными в [11, 12]. Показано, что используемая модель позволяет воспроизвести динамику развития пожара.

В качестве пожарной нагрузки рассматриваются коробки из гофрированного картона с тройной стенкой, что соответствует Class II Commodity согласно классификации [17]. Данный тип пожарной нагрузки является типичным и встречается повсеместно. В литературе [18] можно найти теплофизические свойства этого материала в широком диапазоне. Разработанная методика может быть достаточно легко перенесена на другой тип пожарной нагрузки, например на пластики группы А (Group A Plastics) [17].

1. Математическая модель и расчетный код

В настоящей работе используется программа Fire Dynamics Simulator версии 6.6 (NIST, США, [19, 20]) — полевая гидродинамическая модель и компьютерный код, предназначенный для моделирования горения при пожаре. Это один из наиболее популярных и апробированных инструментов для моделирования пожаров. Однако опыт применения FDS для прогнозирования развития пожара на высокостеллажном складе практически отсутствует. Среди примеров подобных публикаций можно выделить работу [21], в которой отдельное внимание уделяется лучистому теплопереносу внутри стеллажа. Отметим, однако, что данная работа частично потеряла свою актуальность, так как в ней использована устаревшая версия FDS 4.0.

Полное описание математической модели FDS 6.6 можно найти в [19]. В основе модели лежат уравнения Навье–Стокса, решение которых выполняется в приближении малых чисел Маха. Для моделирования турбулентного течения применяется метод крупных вихрей (LES) с подсеточной моделью Дидорфа, использующей выражение для турбулентной вязкости через подсеточную кинетическую энергию турбулентности:

$$\mu_{SGS} = \rho C_v \Delta \sqrt{k_{SGS}},$$

где ρ — плотность газа;

$$C_v = 0,1;$$

Δ — характерный размер ячейки сетки;

$$k_{SGS} = \sum_{i=1}^3 (\tilde{u}_i - \hat{u}_i)^2 / 2;$$

$\tilde{u}_i$ — скорость, разрешаемая на сетке;

$\hat{u}_i$ — скорость, осредненная на расширенном сеточном шаблоне.

Коэффициенты турбулентной теплопроводности λ_{SGS} и диффузии $\mathcal{D}_{SGS}$ вычисляются с помощью равенств:

$$\lambda_{SGS}/c_p = \mu_{SGS}/Pr_t;$$

$$\rho \mathcal{D}_{SGS} = \mu_{SGS}/Sc_t,$$

где Pr_t и Sc_t — турбулентные числа Прандтля и Шмидта; полагаются постоянными: $Pr_t = Sc_t = 0,5$.

Для моделирования турбулентного горения применяется подсеточная модель дробления вихрей. Рассматривается бесконечно быстрая одностадийная необратимая реакция окисления горючего, а скорость выгорания m'''_{fuel} определяется интенсивностью подсеточного смешения реагентов:

$$m'''_{fuel} = -\rho \min(Y_{fuel}, Y_{O_2}/\sigma_{O_2})/\tau_{mix},$$

где Y_{fuel} , Y_{O_2} — массовые доли соответственно горючего и кислорода;

σ_{O_2} — массовый стехиометрический коэффициент кислорода;

τ_{mix} — подсеточное время смешения.

Подсеточное время смешения вычисляется с учетом временных масштабов, характерных соответственно для диффузии, турбулентного перемешивания и естественной конвекции:

$$\tau_{mix} = \min\left(\frac{\Delta^2}{\mathcal{D} + \mathcal{D}_{SGS}}, \frac{0,4\Delta}{\sqrt{(2/3)k_{SGS}}}, \sqrt{\frac{2\Delta}{g}}\right),$$

где $\mathcal{D}$, $\mathcal{D}_{SGS}$ — молекулярный и подсеточный коэффициенты диффузии;

g — ускорение свободного падения.

Количества сажи и монооксида углерода, образующиеся при расходовании 1 кг горючего, полагаются постоянными и задаются в исходных данных.

Для расчета лучистого теплопереноса применяется метод контрольных объемов. Уравнение переноса энергии излучения решается с использованием 300 дискретных угловых направлений (вместо 104 по умолчанию). Спектральные свойства газообразных продуктов сгорания и сажи учитываются в приближении серого газа. Эффективный коэффициент поглощения смеси диоксида углерода (CO_2), H_2O и сажи вычисляется с помощью процедуры RadCal в зависимости от локальных значений концентраций и температуры. Эмиссия излучения I_b вычисляется по формуле

$$I_b = C\sigma\tilde{T}^4/\pi,$$

где C — коэффициент, определяемый таким образом, чтобы доля энергии, излучаемой пламенем, составляла наперед заданное значение f_r ;

σ — постоянная Стефана–Больцмана;

$\tilde{T}$ — разрешенная температура.

Такой способ расчета эмиссии излучения существенно снижает требования к пространственному разрешению высокотемпературных зон в турбулентном пламени.

Расчеты, представленные в настоящей работе, выполнены с настройками, принятыми по умолчанию в версии FDS 6.6, если иные настройки не отмечены отдельно.

Ниже приводится краткое описание предлагаемой тепловой модели пиролиза горючих материалов.

Теплопередача в твердой фазе описывается одномерным уравнением теплопроводности в слое материала:

$$\rho_s c_s \frac{\partial T}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x} \left(\lambda_s \frac{\partial T}{\partial x} \right), \quad (1)$$

где λ_s , ρ_s , c_s — теплопроводность, плотность и теплоемкость материала; координата направлена по нормали к нагреваемой поверхности.

Источники (стоки) тепла, обусловленные поглощением тепла в эндотермической реакции пиролиза, не принимаются во внимание. Граничное условие на нагреваемой поверхности учитывает теплопроводность в глубь материала, поглощение теплового излучения, собственное излучение поверхности, а также конвективный теплоперенос из газовой фазы. В соответствии с тепловой теорией имеет место инертный (без газификации) нагрев материала до достижения критической температуры поверхности (температуры воспламенения T_{ign}) и последующее выгорание материала с постоянной, наперед заданной скоростью потери массы m'' . В последнем случае тепловой поток, поступающий в глубь слоя материала, снижается на $\Delta h_g m''$ (где Δh_g — теплота газификации). При этом продолжается расчет температуры поверхности материала, что позволяет учесть

ее существенный рост для материалов, разлагающихся с образованием углистого остатка.

Для учета конечной толщины слоя вводится величина τ_b , описывающая время полного выгорания материала. По истечении времени τ_b после воспламенения скорость выгорания полагается равной нулю. Численное значение времени выгорания связано с толщиной слоя материала δ и скоростью его выгорания m'' соотношением

$$\tau_b = \rho_s \delta / m'' . \quad (2)$$

Применение тепловой модели распространения пламени по горючей поверхности требует задания следующих параметров (свойств горючего материала): температуры воспламенения T_{ign} , скорости выгорания m'' , времени выгорания τ_b и теплоты газификации Δh_g . Кроме того, требуется задать теплофизические свойства горючего материала (плотность, теплоемкость и теплопроводность), которые в данной модели полагаются постоянными.

2. Апробация тепловой модели для численного моделирования развития пожара на высокостеллажном складе

2.1. Описание экспериментального сценария и постановка задачи

Значительный опыт полномасштабных экспериментов, воспроизводящих условия пожаров на высокостеллажных складах, накоплен в компании FM Global (США). Результаты экспериментального и численного исследования развития пожара на складах высокостеллажного хранения разной конфигурации для нескольких типов пожарной нагрузки приведены в [9–12].

В работе [13] рассматривается пожар на складе, предназначенном для хранения промышленных рулонов бумаги, дается анализ динамики развития пожара, включая результаты измерения мощности тепловыделения и других величин. В [12] приводятся данные о развитии пожара на складе, на котором в качестве пожарной нагрузки выступают картонные коробки (Class II Commodity), установленные на деревянные поддоны. Показано влияние поддонов на режим распространения пламени по стеллажу и динамику мощности тепловыделения.

В работе [11] рассматривается горение двух трехъярусных стеллажей с двумя рядами коробок: $2 \times 6 \times 3 = 36$ коробок и $2 \times 4 \times 3 = 24$ коробки (рис. 1). Коробки кубической формы с длиной стороны 1,07 м расположены так, что расстояние между ними в горизонтальном направлении составляет 15 см, в вертикальном — 46 см. Коробки установлены на металлические подставки, заменяющие деревянные поддоны. Нижний ряд коробок находится на высоте 13 см от пола.

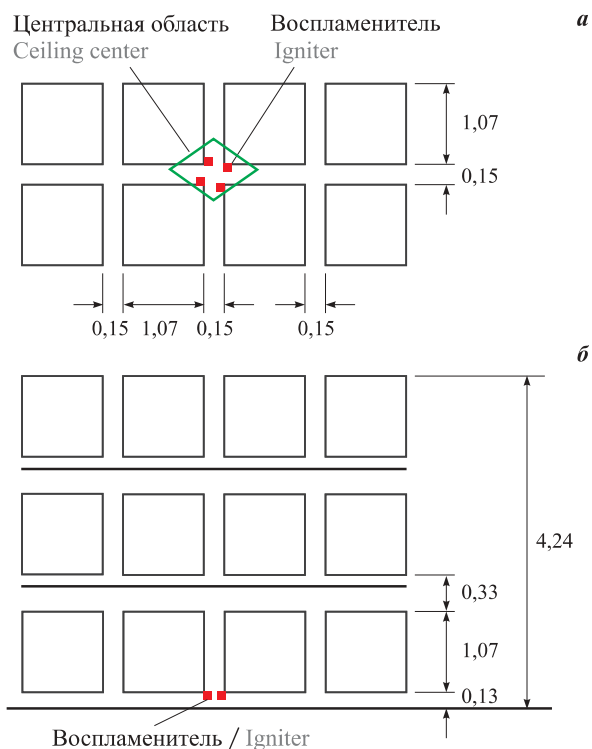


Рис. 1. Стеллаж, использованный в полномасштабных экспериментах [11]: а — вид сверху; б — вид сбоку

Fig. 1. High-rack storage used in experiments [11]: a — top view; b — side view

Горение инициируется четырьмя воспламенителями (вата, смоченная горючей жидкостью), симметрично расположенными внизу нижнего яруса в центре стеллажа.

2.2. Расчетная область

Для численного расчета развития пожара используется экспериментальный сценарий из работы [11]. Рассматривается трехъярусный стеллаж, содержащий $2 \times 4 \times 3 = 24$ коробки (рис. 2). Система пожаротушения не активируется.

Размеры и расположение коробок соответствуют описанию эксперимента [11]. Воспламенители моделируются в виде четырех отдельных элементов с заданной постоянной мощностью тепловыделения 22,5 кВт в каждом, расположенных так же, как в эксперименте, описанном в [11].

Прямоугольная расчетная область (см. рис. 2) размером $10,7 \times 8,3 \times 8,0$ м (длина, ширина, высота) разбивается на несколько подобластей, в которых построены кубические сетки с размером ячейки 2,5; 5,0 и 10,0 см. Наиболее мелкая сетка (2,5 см) используется внутри зоны, в которой расположены четыре центральные колонны коробок (на горизонтальный проем внутри этой зоны приходится шесть ячеек). Размер ячеек сетки вокруг боковых коробок и над центральными коробками, где формируется основной тепловой факел, составляет 5 см. На пе-

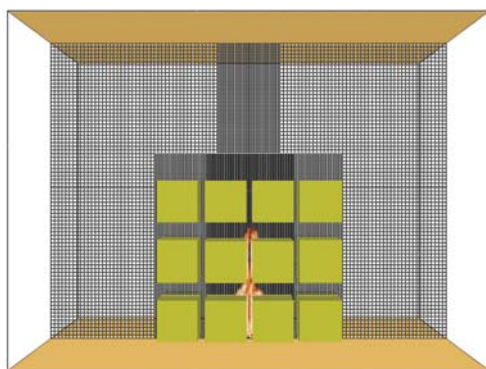


Рис. 2. Расчетная область с сеткой в центральной плоскости
Fig. 2. Computational domain with computational grid in the central plane

риферии используется самая крупная сетка с размером ячеек 10 см. Общее количество ячеек сетки — 3 103 220. Расчет 320 с времени задачи с использованием 54 вычислительных ядер (2 CPU Intel Xeon E5-2697 v3) занимает 125 ч.

2.3. Выбор модельных параметров

В расчетах использованы теплофизические свойства горючего материала, приведенные в [11]: плотность $\rho_s = 184 \text{ кг/м}^3$, теплоемкость $c_s = 2700 \text{ Дж/(кг·К)}$, теплота сгорания $\Delta h_c = 14,2 \text{ МДж/кг}$. Коэффициент теплопроводности полагали $\lambda_s = 0,1 \text{ Вт/(м·К)}$, что соответствует значениям, характерным для гофрированного картона [18]. Отметим, что в работе [11] в расчетах полагали $\lambda_s = 0,4 \text{ Вт/(м·К)}$.

Для использования модели необходимо определить значения следующих параметров:

- 1) температуры воспламенения T_{ign} ;
- 2) удельной мощности тепловыделения Q'' , связанной с удельной массовой скоростью выгорания m'' : $Q'' = m'' \Delta h_c$;
- 3) времени выгорания материала, связанного с толщиной слоя δ : $\tau_b = \rho_s \delta / m''$;
- 4) теплоты газификации материала Δh_g .

Для температуры воспламенения выбрано значение $T_{ign} = 360 \text{ °C}$, характерное для гофрированного картона [22]. Отметим, что в соответствии с тепловой теорией время задержки воспламенения t_{ign} термически толстого слоя при суммарном тепловом потоке $q''_{net} = 15 \text{ кВт/м}^2$ составит: $t_{ign} = (\pi/4) \lambda_s \rho_s c_s [(T_{ign} - T_0)/q''_{net}]^2 = 20 \text{ с}$. Численный расчет показывает, что это примерно соответствует моменту, когда общая мощность тепловыделения при горении материала ящиков превышает мощность воспламенителей (90 кВт).

Удельная мощность тепловыделения для данного сценария может быть определена из общей динамики роста мощности тепловыделения, которая приводится в [11]. Согласно описанию эксперимента [11] на 85-й секунде полная мощность тепловы-

деления составляет 10 МВт, при этом пламенем полностью охвачены второй и третий уровни центральных колонн. Таким образом, площадь поверхности картона, на которой происходит тепловыделение, равна площади поверхности восьми коробок, т. е. $1,07^2 \cdot 6 \cdot 8 = 55 \text{ м}^2$. Удельная мощность тепловыделения в таком случае $Q'' = 10\,000/55 = 182 \text{ кВт/м}^2$. Далее, в момент времени 150 с пламенем охвачено уже 16 коробок. Таким образом, площадь поверхности коробок, обхваченных пламенем, увеличивается примерно в 2 раза, а измеренное значение общей мощности тепловыделения составляет порядка 20–23 МВт. Это значит, что удельная мощность тепловыделения остается прежней. На основе приведенных оценок в расчетах было использовано значение $Q'' = 200 \text{ кВт/м}^2$.

Поскольку количество материала, доступного для сжигания, ограничено толщиной слоя δ , необходимо учесть возможность полного выгорания материала. Согласно измерениям, приведенным в [12], стадия снижения мощности тепловыделения наступает примерно спустя 290 с после зажигания. Будем полагать, что это снижение обусловлено выгоранием материала, и примем $\tau_b = 290 \text{ с}$. С учетом заданной удельной мощности тепловыделения и плотности материала получаем $\delta = \tau_b Q'' / (\rho_s \Delta h_c) = 0,022 \text{ м}$, что превышает типичное значение толщины промышленного гофрированного картона [22]. Такое расхождение обусловлено тем, что в приведенных оценках не учитывается возможное изменение скорости выгорания материала во времени.

Теплота газификации материала Δh_g учитывается в тепловом балансе на поверхности материала после воспламенения. При этом тепловой поток, поступающий в глубь слоя материала и используемый в расчете температуры поверхности, снижается на $m'' \Delta h_g$. Такой подход позволяет учесть существенный рост температуры поверхности для материалов, разлагающихся с образованием углистого остатка.

Неправильно подобранное значение Δh_g может привести к ошибочным значениям температуры поверхности и, как следствие, радиационного теплового потока, излучаемого с горячей поверхности коробок, а также радиационного потока, воспринимаемого еще не зажженной поверхностью. В частности, заниженное значение Δh_g приводит к тому, что в результате расчета будут получены заниженное время воспламенения поверхностей внутри стеллажа и завышенная скорость роста мощности тепловыделения.

На рис. 3 показана расчетная зависимость мощности тепловыделения от времени для трех значений теплоты газификации. На основании полученных данных можно сделать вывод о том, что при теп-

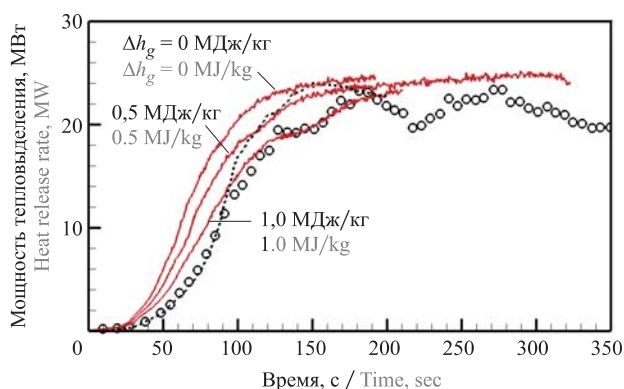


Рис. 3. Зависимость мощности тепловыделения от времени [11] (○ — измерения, — расчет с помощью FireFOAM) и по тепловой модели FDS 6 (—). Перепечатывается из [15] с разрешения издательства Elsevier

Fig. 3. Heat release rate dependency on time according to [11]: (○ — measurements, — FireFOAM predictions) and according to the thermal model in FDS 6 (—). Reprinted from [15] with permission from Elsevier

лоте газификации 1 МДж/кг можно воспроизвести экспериментальные данные с удовлетворительной точностью. Отметим, что данное значение согласуется с литературными данными по теплоте газификации полимерных материалов.

3. Результаты расчетов

С использованием набора параметров, процедура подбора которых описана выше, было проведено численное моделирование развития пожара согласно сценарию, приведенному в [11]. На рис. 4 показана динамика развития пожара, визуализированная мгно-

венными изоповерхностями объемной мощности тепловыделения (200 кВт/м^3). Как отмечено в работе [11], скорость роста мощности тепловыделения при распространении пламени вертикально вверх по стеллажу существенно выше, чем при распространении в горизонтальном направлении, а одновременное протекание указанных процессов обуславливает сложную картину развития пожара.

На основании полученных результатов можно выделить следующие стадии развития пожара после зажигания нижнего яруса коробок, которое происходит в момент времени 15 с:

- 1-я (16–50 с): распространение пламени вверх по вертикальным поверхностям центральных коробок; вершина пламени достигает высоты верхнего яруса;
- 2-я (50–80 с): распространение пламени в горизонтальном направлении по нижним поверхностям центральных коробок верхнего яруса; вершина пламени поднимается до высоты потолка;
- 3-я (80–120 с): распространение пламени вертикально вверх и по горизонтали; все вертикальные поверхности центральных коробок на втором и третьем ярусах охвачены пламенем;
- 4-я (120–140 с): распространение пламени в горизонтальном направлении в сторону боковых коробок между вторым и третьим ярусами;
- 5-я (140–190 с): распространение пламени в горизонтальном и вертикальном направлениях. Все вертикальные поверхности коробок второго и третьего ярусов оказываются обхвачены пламенем, а мощность тепловыделения достигает максимума.

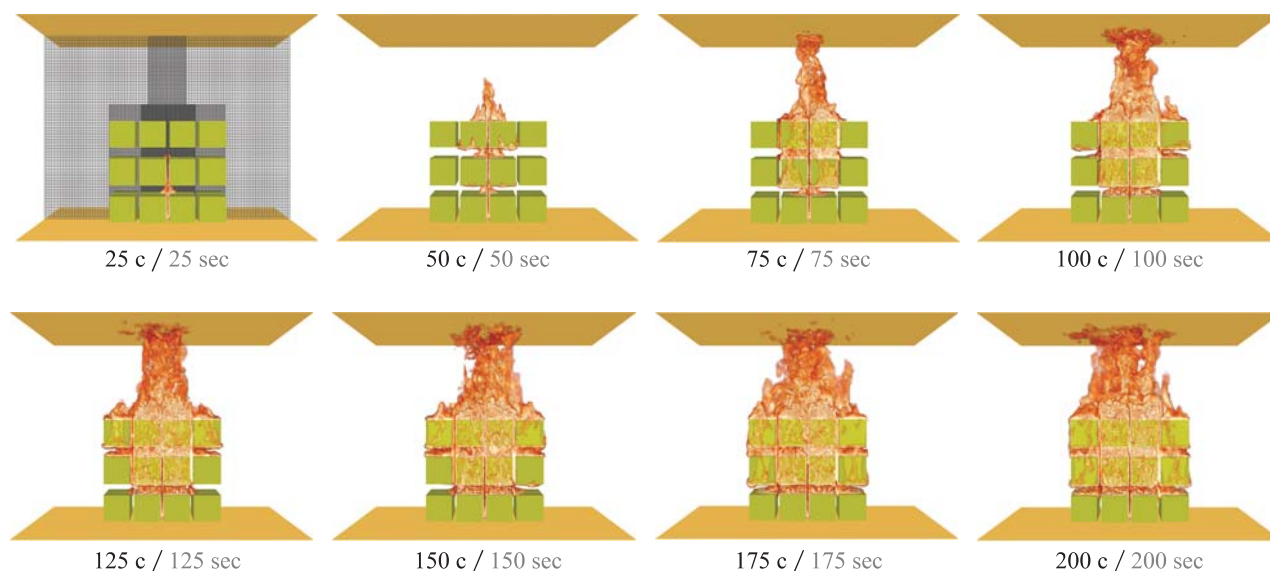


Рис. 4. Визуализация пламени (изоповерхность объемной мощности тепловыделения 200 кВт/м^3) для стеллажа $2 \times 4 \times 3$. На левом верхнем фрагменте — расчетная сетка в центральной плоскости. Перепечатывается из [15] с разрешения издательства Elsevier

Fig. 4. Flame snapshots (200 kW/m^3 iso-surface of heat release rate per unit volume) for a $2 \times 4 \times 3$ rack storage. The top left Figure depicts the computational grid in the central plane. Reprinted from [15] with permission from Elsevier

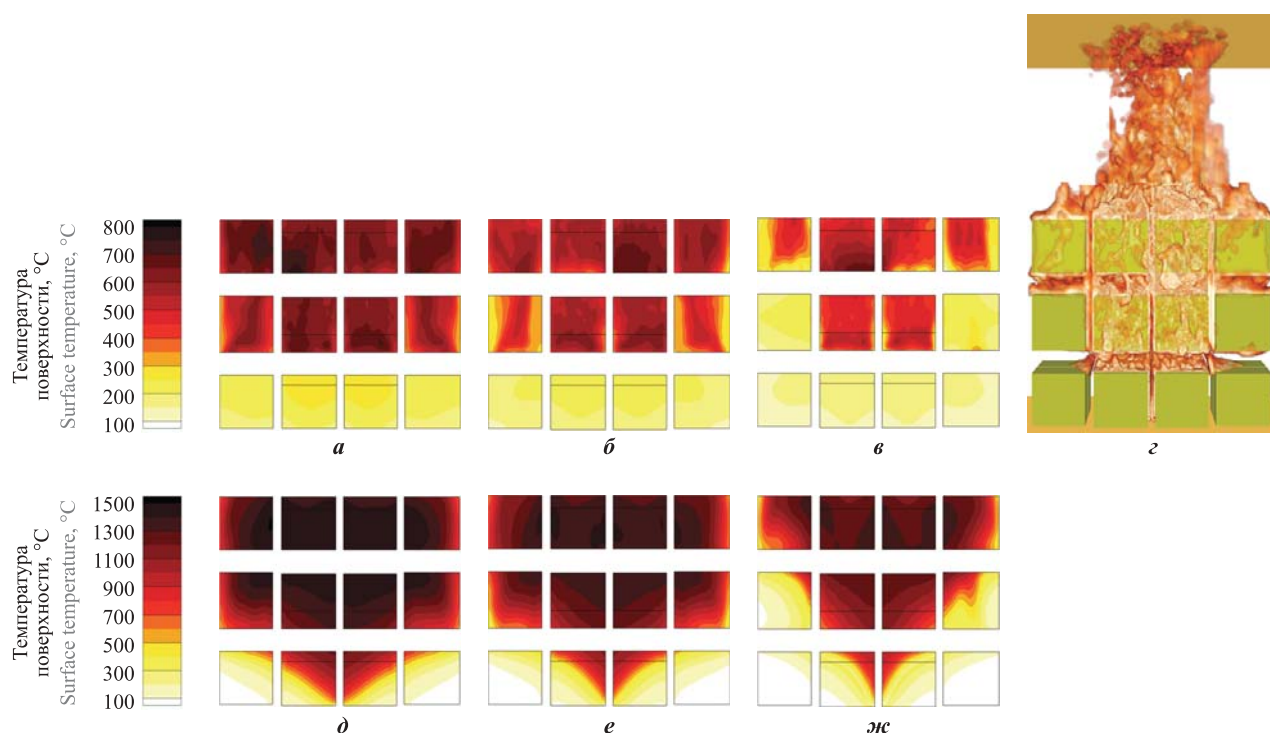


Рис. 5. Расчетная температура поверхностей коробок, обращенных наружу (*a–в*) и внутрь стеллажа (*д–жс*), при значениях теплоты газификации 0 МДж/кг (*a, д*), 0,5 МДж/кг (*б, е*), 1 МДж/кг (*в, жс*) и визуализация пламени (*з*) в момент времени 150 с (теплота газификации 1 МДж/кг, показаны изоповерхности объемной мощности тепловыделения 200 кВт/м³). Фрагменты (*з, д, е, жс*) перепечатываются из [15] с разрешения издательства Elsevier

Fig. 5. Predicted temperatures of outer (*a, b, v*) and inner (*d, e, zh*) surfaces of the rack at 150 sec. Heat of gasification is 0 MJ/kg (*a, d*), 0.5 MJ/kg (*b, e*), 1 MJ/kg (*v, zh*). Flame snapshot (200 kW/m³ iso-surface of heat release rate per unit volume, heat of gasification is 1 MJ/kg) at 150 sec is shown in (*g*). Fragments (*g, d, e, zh*) reprinted from [15] with permission from Elsevier

Приведенная динамика развития пожара удовлетворительно воспроизводит экспериментальные наблюдения, а также результаты численного моделирования этого же сценария, выполненного с использованием кода FireFOAM в [11].

Полученное распределение температуры на поверхности коробок внутри стеллажа показано на рис. 5. Расчетная температура поверхности коробок с внутренней стороны стеллажа оказывается значительно выше (примерно на 500 °C), чем с внешней стороны [11]. Данное различие обусловлено разными условиями лучистого и конвективного теплообмена на внутренних и внешних поверхностях.

Согласно формулировке тепловой модели пиролиза температура поверхности коробок тем ниже, чем выше теплота газификации. При низкой теплоте газификации Δh_g температура поверхности коробок, обращенных внутрь стеллажа, принимает максимальные значения — порядка 1000–1500 °C. Это ведет к интенсификации лучистого теплообмена внутри стеллажа и сокращению времени задержки воспламенения еще не зажженных поверхностей. Именно этим и объясняется завышенная скорость роста мощности тепловыделения при $\Delta h_g = 0 \div 0,5$ МДж/кг, показанная на рис. 3.

Температура поверхностей коробок, обращенных наружу стеллажа, не оказывает влияния на динамику развития пожара. Можно ожидать, однако, что при наличии боковых стеллажей будет наблюдаться аналогичный эффект интенсификации лучистого теплообмена и более раннего зажигания соседних стеллажей.

На рис. 6 показано распределение суммарного теплового потока по поверхности коробок, пола и потолка. Максимальное значение составляет порядка 100 кВт/м² и наблюдается в зоне, где вершина пламени достигает потолка. Отметим, что данное значение существенно превышает критическое значение теплового потока, при котором происходит зажигание многих материалов, используемых на практике (20 кВт/м²). Таким образом, если в отделке перекрытия будут использованы горючие материалы, то можно ожидать их зажигания и распространения пламени по потолку к соседним стеллажам.

На рис. 7 показана зависимость температуры и вертикальной составляющей скорости в центре стеллажа на высоте 3,71 м от времени. К сожалению, в экспериментальном прототипе в [11] отсутствуют данные по температуре и скорости газа внутри стеллажа. Полученные значения сравниваются с результатами измерений, приведенными в работе [12], в ко-

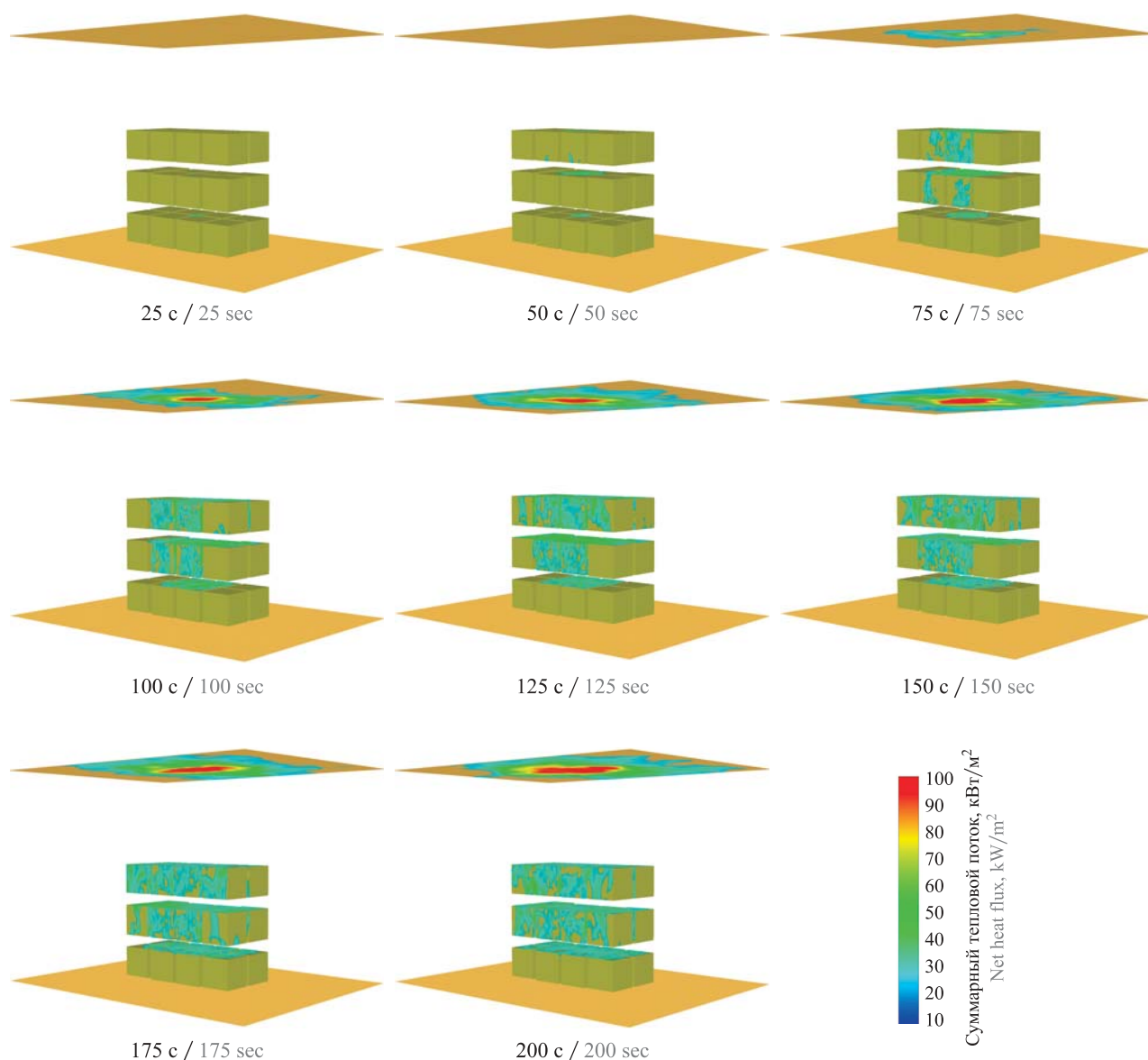


Рис. 6. Распределение суммарного теплового потока по поверхности коробок, пола и потолка для стеллажа $2 \times 4 \times 3$ при теплоте газификации 1 МДж/кг

Fig. 6. Net heat flux at cardboard boxes, ceiling and floor for a $2 \times 4 \times 3$ rack storage. Heat of gasification is 1 MJ/kg

торой рассматривался аналогичный сценарий зажигания и горения идентичного стеллажа, а основное отличие от сценария в [11] заключалось в учете деревянных поддонов.

На рис. 7 видно, что полученные результаты качественно воспроизводят имеющиеся экспериментальные данные. Количественное рассогласование вызвано различием в постановке задачи. Согласно анализу, приведенному в [12], наличие деревянных поддонов снижает интенсивность воздухообмена внутри стеллажа за счет уменьшения горизонтальных зазоров. Это приводит к снижению количества кислорода, доступного для сжигания, а эффект дымовой трубы оказывается менее выраженным. Таким образом, мгновенные значения температуры и скорости газа внутри стеллажа, полученные в данной

работе (в отсутствие деревянных поддонов), оказываются выше, чем измеренные в эксперименте [12]. Полученные данные можно использовать для оценки эффективности тепловых датчиков, которые обычно устанавливаются внутри стеллажа и под перекрытием.

Наконец, преимуществом данного подхода является возможность масштабируемости рассматриваемого сценария. В частности, ниже приводятся результаты расчета развития пожара на стеллаже аналогичной конфигурации, но с пятью ярусами. Отметим, что стадии развития пожара в данном случае соответствуют описанным ранее для базового сценария (стеллаж с тремя ярусами в высоту). Пламя, формирующееся в центре стеллажа во время первой стадии, зажигает боковые поверхности ко-

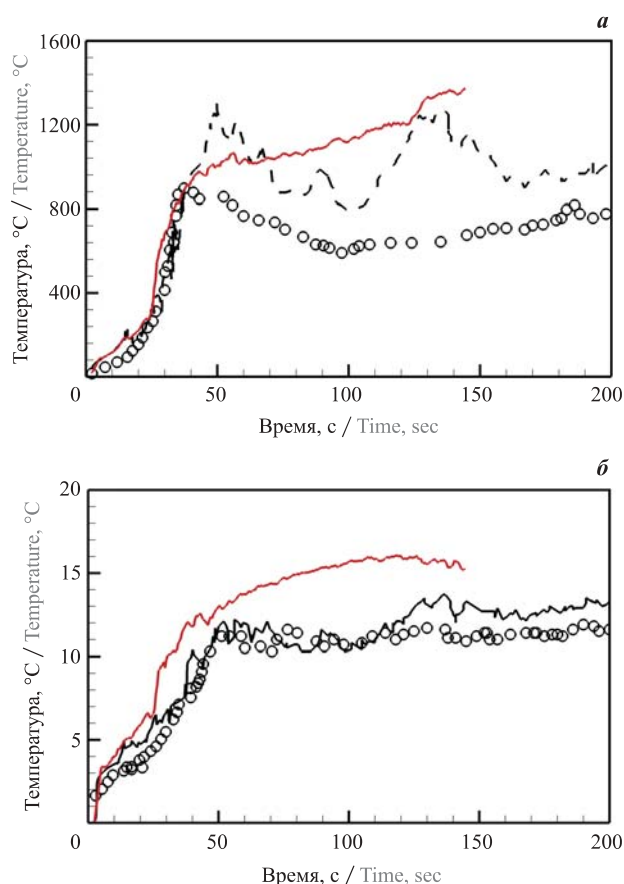


Рис. 7. Зависимость температуры (а) и скорости газа (б) внутри стеллажа 2×4×3 на высоте 3,71 м от времени по данным [12] (○ — измерения; — расчет с помощью Fire-FOAM) и по тепловой модели FDS 6 (—)

Fig. 7. Resolved gas temperature and velocity inside the rack (2×4×3) at 3.71 m height [12] (○ — measurements; — Fire-FOAM predictions) and according to the thermal model in FDS 6 (—)

робок на всех пяти ярусах в течение примерно того же времени, что и для стеллажа с тремя ярусами (около 50 с). К моменту начала второй стадии, когда пламя начинает распространяться в горизонтальном направлении, пламенем оказываются объаты уже $4 \times 5 = 20$ коробок. Таким образом, помимо очевидного повышения максимальной мощности тепловыделения, связанного с увеличением количества пожарной нагрузки, наблюдается также увеличение скорости роста мощности тепловыделения. Зависимость мощности тепловыделения от времени показана на рис. 8 при теплоте газификации для обоих сценариев 1 МДж/кг.

Резкое повышение скорости роста мощности тепловыделения на начальных стадиях при увеличении числа ярусов — важный эффект, который невозможно учесть в рамках концепции проектного пожара. В то же время расчет такого сценария с использованием подробной кинетической модели пи-

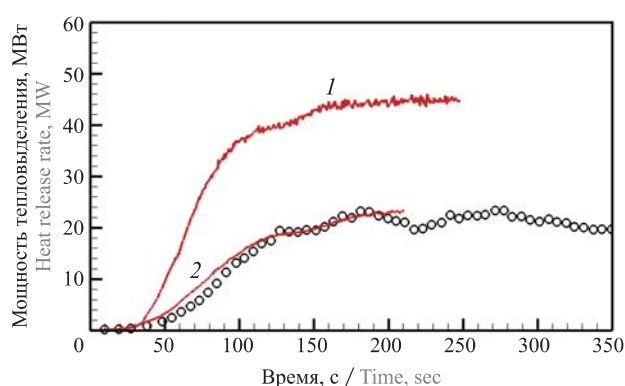


Рис. 8. Зависимость мощности тепловыделения от времени по данным [12] для стеллажей 2×4×3 (○ — измерения) и по тепловой модели FDS 6 для стеллажей 2×4×5 (1) и 2×4×3 (2)

Fig. 8. Heat release rate dependency on time according to measurements [12] for 2×4×3 rack (○) and the thermal model in FDS 6 for 2×4×5 (1) and 2×4×3 (2) racks

ролиза может занять значительное время. Следовательно, результаты настоящей работы, выполненной с применением упрощенной (тепловой) модели пиролиза, приобретают дополнительную практическую значимость и еще раз подтверждают необходимость и целесообразность совместного численного моделирования для подобных сценариев развития пожара. Учету влияния геометрических особенностей конфигурации крупномасштабных стеллажей в реалистичной постановке посвящена дальнейшая работа авторов.

Заключение

Полученные результаты позволяют сделать вывод, что использование упрощенной (тепловой) модели пиролиза обеспечивает адекватное воспроизведение динамики развития пожара на высоко-стеллажном складе, что подтверждается хорошим согласием их с экспериментальными данными.

Преимуществом тепловой модели пиролиза является использование ограниченного числа модельных параметров. Необходимо задать теплофизические свойства горючего материала (плотность, теплоемкость, коэффициент теплопроводности, теплоту сгорания), температуру воспламенения, удельную мощность тепловыделения (или удельную массовую скорость выгорания), время выгорания материала и теплоту его газификации. Предлагаемая методика подбора этих параметров основана на анализе литературных данных и описании имеющихся экспериментальных данных и может быть перенесена на другой тип пожарной нагрузки.

Показано, что рассматриваемая модель может быть использована для описания пожаров при различных характерах складирования грузов и высоте перекрытия помещения.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ / REFERENCES

1. СП 241.1311500.2015. Системы противопожарной защиты. Установки водяного пожаротушения высотных стеллажных складов автоматические. Нормы и правила проектирования. — М. : ВНИИПО МЧС России, 2015. — 14 с. / Set of rules 241.1311500.2015. *Fire protection systems. Automatic water extinguishing systems for high rack storages. Designing and regulations rules*. Moscow, VNIPO Publ., 2015. 14 p. (in Russian).
2. B. Karlsson, J. G. Quintiere. *Enclosure fire dynamics*. Boca Raton, CRC Press, 1999. 336 p. DOI: 10.1201/9781420050219.
3. H.-Z. Yu. Transient plume influence in measurement of convective heat release rates of fast-growing fires using a large-scale fire products collector. *Journal of Heat Transfer*, 1990, vol. 112, issue 1, pp. 186–191. DOI: 10.1115/1.2910343.
4. H.-Z. Yu, P. Stavrianidis. The transient ceiling flows of growing rack storage fires. *Fire Safety Science*, 1991, vol. 3, pp. 281–290. DOI: 10.3801/iafss.fss.3-281.
5. N. J. Alvares, H. K. Hasegawa, K. Hout, A. C. Fernandez-Pello, J. White. Analysis of a Run-away high rack storage fire. *Fire Safety Science*, 1994, vol. 4, pp. 1267–1278. DOI: 10.3801/iafss.fss.4-1267.
6. H. Ingason. Heat release rate of rack storage fires. In: *Proceedings of 9th Fire Science & Engineering Conference (Interflam 2001) (Edinburgh Conference Centre, Scotland, 17–19 September 2001)*. London, Interscience Communications, 2001, pp. 731–740.
7. H. Ingason. In-rack fire plumes. *Fire Safety Science*, 1997, vol. 5, pp. 333–344. DOI: 10.3801/iafss.fss.5-333.
8. H. Ingason. Effects of flue spaces on the initial in-rack plume flow. *Fire Safety Science*, 2003, vol. 7, pp. 235–246. DOI: 10.3801/IAFSS.FSS.7-235.
9. P. Chatterjee, Y. Wang, M. Chaos, K. V. Meredith, X. Zhou, S. B. Dorofeev. Numerical simulation of fire growth on corrugated cardboard commodities in three-tier-high rack storage arrays. In: *Proceedings of 13th Fire Science & Engineering Conference (Interflam 2013) (Royal Holloway College, University of London, UK, 24–26 June 2013)*. London, Interscience Communications, 2013, vol. 1, pp. 163–173.
10. K. V. Meredith, P. Chatterjee, Y. Wang, Y. Xin. Simulating sprinkler based rack storage fire suppression under uniform water application. In: *Proceedings of 7th International Seminar on Fire and Explosion Hazards*, 2013, pp. 511–520. DOI: 10.3850/978-981-07-5936-0_07-08.
11. Y. Wang, K. V. Meredith, X. Zhou, P. Chatterjee, Y. Xin, M. Chaos, N. Ren, S. B. Dorofeev. Numerical simulation of sprinkler suppression of rack storage fires. *Fire Safety Science*, 2014, vol. 11, pp. 1170–1183. DOI: 10.3801/iafss.fss.11-1170.
12. N. Ren, J. de Vries, X. Zhou, M. Chaos, K. V. Meredith, Y. Wang. Large-scale fire suppression modeling of corrugated cardboard boxes on wood pallets in rack-storage configurations. *Fire Safety Journal*, 2017, vol. 91, pp. 695–704. DOI: 10.1016/j.firesaf.2017.04.008.
13. N. Ren, D. Zeng, K. Meredith, M. Chaos. CFD modeling of fire growth between vertical paper rolls. In: *Proceedings of the 9th U. S. National Combustion Meeting (Cincinnati, Ohio, 17–20 May 2015)*, 2015, pp. 1–10.
14. E. Markus, A. Snegirev, E. Kuznetsov, L. Tanklevskiy. Application of a simplified pyrolysis model to predict fire development in rack storage facilities. *Journal of Physics: Conference Series*, 2018, vol. 1107, article no. 042012, 7 p. DOI: 10.1088/1742-6596/1107/4/042012.
15. E. Markus, A. Snegirev, E. Kuznetsov, L. Tanklevsiy. Application of a simplified pyrolysis model to predict flame spread over continuous and discrete fire load. *Fire Safety Journal*, 2019, In press.
16. A. Snegirev, E. Kuznetsov, E. Markus. Coupled analytical approach to predict piloted flaming ignition of non-charring polymers. *Fire Safety Journal*, 2017, vol. 93, pp. 74–83. DOI: 10.1016/j.firesaf.2017.08.006.
17. NFPA 13. *Standard for the Installation of Sprinkler Systems*. Quincy, Massachusetts, NFPA, 2016. 496 p.
18. M. Chaos, M. M. Khan, S. B. Dorofeev. Pyrolysis of corrugated cardboard in inert and oxidative environments. *Proceedings of the Combustion Institute*, 2013, vol. 34, issue 2, pp. 2583–2590. DOI: 10.1016/j.proci.2012.06.031.
19. K. McGrattan, S. Hostikka, R. McDermott, J. Floyd, M. Vanella, C. Weinschenk, K. Overholt. *Fire Dynamics Simulator. Technical Reference Guide. Volume 1: Mathematical Model (Version 6.6.0)*. NIST Special Publication 1018-1, Gaithersburg, Maryland, National Institute of Standards and Technology, 2017.
20. Fire Dynamics Simulator (FDS) and Smokeview (SMV). Available at: <https://pages.nist.gov/fds-smv/> (Accessed 15 May 2018).
21. K. Guedri, M. N. Borjini, M. Jeguirim, J.-F. Brilhac, R. Saïd. Numerical study of radiative heat transfer effects on a complex configuration of rack storage fire. *Energy*, 2011, vol. 36, issue 5, pp. 2984–2996. DOI: 10.1016/j.energy.2011.02.042.

22. M. Čekon, K. Struhala, R. Slávik. Cardboard-based packaging materials as renewable thermal insulation of buildings: thermal and life-cycle performance. *Journal of Renewable Materials*, 2017, vol. 5, issue 1, pp. 84–93. DOI: 10.7569/JRM.2017.634135.

Поступила 26.05.2019; после доработки 19.06.2019; принята к публикации 21.06.2019
Received 26 May 2019; received in revised form 19 June 2019; accepted 21 June 2019

Информация об авторах

МАРКУС Екатерина Сергеевна, аспирант кафедры “Гидроаэродинамика, горение и теплообмен”, Институт прикладной математики и механики, Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого, г. Санкт-Петербург, Российская Федерация; ORCID: 0000-0002-5272-3863; Researcher ID: O-7231-2017; Scopus ID: 57195585949; e-mail: eksmarkus@gmail.com

СНЕГИРЕВ Александр Юрьевич, д-р техн. наук, доцент, профессор кафедры “Гидроаэродинамика, горение и теплообмен”, Институт прикладной математики и механики, Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого, г. Санкт-Петербург, Российская Федерация; ORCID: 0000-0002-6752-8809; Researcher ID: N-4484-2013; Scopus ID: 7003753536; e-mail: a.snegirev@phmf.spbstu.ru

КУЗНЕЦОВ Егор Александрович, аспирант кафедры “Гидроаэродинамика, горение и теплообмен”, Институт прикладной математики и механики, Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого, г. Санкт-Петербург, Российская Федерация; ORCID: 0000-0003-4618-870X; Researcher ID: P-9051-2017; Scopus ID: 57195590678; e-mail: kn0egor@gmail.com

ТАНКЛЕВСКИЙ Леонид Тимофеевич, д-р техн. наук, профессор, заведующий базовой кафедрой “Пожарная безопасность”, Инженерно-строительный институт, Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого, г. Санкт-Петербург, Российская Федерация; ORCID: 0000-0002-2769-0086; Researcher ID: S-1901-2017; Scopus ID: 57192367552; e-mail: tanklevskij_lt@spbstu.ru

АРАКЧЕЕВ Александр Валерьевич, аспирант кафедры “Пожарная безопасность”, Инженерно-строительный институт, Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого, г. Санкт-Петербург, Российская Федерация; ORCID: 0000-0003-2222-7970; e-mail: arakcheev@gefest-spb.ru

Information about the authors

Ekaterina S. MARKUS, Postgraduate Student of Department of Fluid Dynamics, Combustion and Heat Transfer, Institute of Applied Mathematics and Mechanics, Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University, St. Petersburg, Russian Federation; ORCID: 0000-0002-5272-3863; Researcher ID: O-7231-2017; Scopus ID: 57195585949; e-mail: eksmarkus@gmail.com

Alexander Yu. SNEGIREV, Dr. Sci (Eng.), Docent, Professor of Department of Fluid Dynamics, Combustion and Heat Transfer, Institute of Applied Mathematics and Mechanics, Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University, St. Petersburg, Russian Federation; ORCID: 0000-0002-6752-8809; Researcher ID: N-4484-2013; Scopus ID: 7003753536; e-mail: a.snegirev@phmf.spbstu.ru

Egor A. KUZNETSOV, Postgraduate Student of Department of Fluid Dynamics, Combustion and Heat Transfer, Institute of Applied Mathematics and Mechanics, Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University, St. Petersburg, Russian Federation; ORCID: 0000-0003-4618-870X; Researcher ID: P-9051-2017; Scopus ID: 57195590678; e-mail: kn0egor@gmail.com

Leonid T. TANKLEVSKIY, Dr. Sci (Eng.), Professor, Head of Fire Safety Department, Institute of Civil Engineering, Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University, St. Petersburg, Russian Federation; ORCID: 0000-0002-2769-0086; Researcher ID: S-1901-2017; Scopus ID: 57192367552; e-mail: tanklevskij_lt@spbstu.ru

Aleksandr V. ARAKCHEEV, Postgraduate Student of Fire Safety Department, Institute of Civil Engineering, Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University, St. Petersburg, Russian Federation; ORCID: 0000-0003-2222-7970; e-mail: arakcheev@gefest-spb.ru



САХАПРОМЭКСПО-2019

**НЕДРА ЯКУТИИ. ГОРНОЕ ДЕЛО.
УГОЛЬ МАЙНИНГ. ЗОЛОТОДОБЫЧА.
СПЕЦТЕХНИКА. ЭКОЛОГИЯ.**

30 - 31 октября г.ЯКУТСК

Организаторы:



**Выставочная компания
Сибэкспосервис**
г. Новосибирск



**Выставочная компания
СахаЭкспоСервис**
г. Якутск

Тел: (383) 3356350

E-mail: vk ses@yandex.ru

www.ses.net.ru

Особенности токовой перегрузки в автомобильной электрической сети

© А. И. Недобитков✉

Казахский гуманитарно-юридический инновационный университет
(Республика Казахстан, 070014, г. Усть-Каменогорск, ул. Астана, 48)

РЕЗЮМЕ

Введение. Приведенные в статье данные свидетельствуют о том, что проблема повышения пожарной безопасности автотранспортных средств очень актуальна. Целью статьи является разработка научно обоснованного метода исследования медного проводника, подвергнутого действию сверхтока, для установления причины его повреждения в ходе пожарно-технической экспертизы.

Материалы и методика. Исследования проводились с использованием растрового электронного микроскопа JSM-6390LV с приставкой для энергодисперсионного микроанализа. Поверхности разрушения медного проводника подвергались анализу без предварительной пробоподготовки.

Результаты и обсуждение. На основе анализа экспериментальных данных показано, что температура медного проводника, подвергнутого токовой перегрузке, существенно различается по его длине. Натурными наблюдениями и экспериментальными результатами установлено, что разрушение медного проводника под действием сверхтока происходит в местах, имеющих предварительное напряжение вследствие пластической деформации. Экспериментально также подтверждено, что образование шаровых оплавлений медного проводника, подвергнутого токовой перегрузке, может происходить при температуре значительно ниже температуры плавления меди. На основе анализа теоретических данных показано, что при токовой перегрузке в медном проводнике происходят не только тепловые и электромагнитные процессы, но и пластическая дисторсия.

Заключение. Предложен метод дифференциации повреждения при пожаре (токовая перегрузка, короткое замыкание) медного проводника. Токовая перегрузка характеризуется такими признаками, как вздутия или шаровые оплавления, расположенные в местах изгиба медного проводника, отсутствие признаков массопереноса. Установлено, что признаки, выявленные на поверхностях разрушения медного проводника, подвергнутого протеканию сверхтока, являются устойчивыми и не подвержены изменениям в естественных условиях хранения. Приведенные в статье данные могут быть использованы специалистами при экспертном исследовании медных проводников, изымаемых с мест пожаров, установлении механизма их повреждения и, в конечном счете, причины пожара автомобиля.

Ключевые слова: пожар; медный проводник; большое переходное сопротивление; короткое замыкание; сверхток; медь; растровая электронная микроскопия; диагностический признак; микрослед; пожарно-техническая экспертиза, пластическая дисторсия.

Для цитирования: Недобитков А. И. Особенности токовой перегрузки в автомобильной электрической сети // Пожаровзрывобезопасность/Fire and Explosion Safety. — 2019. — Т. 28, № 4. — С. 42–50. DOI: 10.18322/PVB.2019.28.04.42-50.

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

Peculiarities of current overload in the car electric network

© Alexandr I. Nedobitkov✉

Kazakh Humanitarian Law Innovative University
(Astana St., 48, Ust-Kamenogorsk, 070014, Kazakhstan)

ABSTRACT

Introduction. The data given in the article show that the problem of fire safety in motor vehicles is highly relevant. The purpose of the article is to develop a scientifically based method of research for the copper conductor exposed to overcurrent to find the reason of its damage when making a fire investigation.

Materials and methods. The research was conducted using the JSM-6390LV scanning electron microscope for energy dispersive spectroscopy. The surfaces of the copper conductor rupture were analyzed without any preliminary sample preparation.

Results and discussion. The analysis of the experimental evidence demonstrates that the temperature of the copper conductor exposed to current overload varies significantly along its length. It was found through the field studies and experimental results that the rupture of the copper conductor under the action of overcurrent happens in the sections that have prestress due to the plastic deformation. The experiment proved that the formation of ball fusing of the copper conductor exposed to current overload may take place at a substantially lower temperature than that of the copper smelting. The analysis of the theoretical data shows that during the current overload not

only thermal and electromagnetic processes but also plastic distortion occur at the copper conductor. It also demonstrates that the strand connection of copper wires results in a fire hazard not in every instance.

Conclusion. A method for differentiating fire damages at the copper conductor (current overload, short circuit) was suggested. The current overload has such features as blistering or ball fusing in the bending points and the lack of any signs of mass transfer. It was found that the features of the damaged surfaces of the copper conductor exposed to overcurrent are stable and not subject to changes in the natural storage conditions. The data given in the article can be used by specialists when making an expert examination of copper conductors from the fire locations, identifying a mechanism for their damage and, finally, a cause of fire.

Keywords: fire; copper conductor; high transition resistance; short circuit; overcurrent; copper; scanning electron microscopy; diagnostic feature; ultratrace; fire investigation; plastic distortion.

For citation: A. I. Nedobitkov. Peculiarities of current overload in the car electric network. *Pozharovzryvobezopasnost/ Fire and Explosion Safety*, 2019, vol. 28, no. 4, pp. 42–50 (in Russian). DOI: 10.18322/PVB.2019.28.04.42-50.

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

Введение

Пожары, представляя собой тяжелую чрезвычайную ситуацию (ЧС), приносят значительный ущерб экономике государств, в частности в промышленно развитых странах он превышает 1 % национального дохода и имеет тенденцию к постоянному росту [1–3]. Пожары на автотранспортных средствах относятся к особо тяжелым ЧС.

В работах [4–13] показано, что отдельные элементы электрической системы автомобиля могут служить источником возгорания в случае возникновения аварийного режима в какой-либо функциональной цепи.

Авторы работы [6] подчеркивают, что при исследовании сгоревшего автомобиля практически всегда рассматривается так называемая “электрическая” версия возникновения пожара. Данным обстоятельством обусловлена насущная потребность в разработке и совершенствовании специальных методик исследования электросетей и электрооборудования автотранспортных средств после пожара [6].

Как наглядно показано авторами [4–13], в рамках судебной пожарно-технической экспертизы рассматривается вероятность возникновения пожара в результате протекания трех аварийных режимов работы электросети — короткого замыкания (КЗ), большого переходного сопротивления (БПС) и токовой перегрузки (ТП).

В диссертации [10] отмечается трудность визуальной дифференциации оплавлений медных проводников. Это мнение в той или иной форме поддерживается в работах [6, 9, 11, 12] а также такими исследователями, как V. Babrauskas, Kuan-Heng Liu, Yung-Hui Shih, Guo-Ju Chen и др., которые предлагают альтернативные методы исследования [14–23].

Настоящая работа, являясь продолжением исследований, выполненных авторами [6, 9, 12, 23], также посвящена установлению признаков, позволяющих идентифицировать причину разрушения медного проводника под действием сверхтока.

Целью работы является разработка научно обоснованного метода исследования медного проводника, подвергнутого воздействию токовой перегрузки.

Исходя из этого были поставлены следующие задачи исследования:

- показать, что разрушение медного проводника автомобильной электрической сети под действием токовой перегрузки происходит в первую очередь в местах, имеющих предварительное напряжение вследствие пластической деформации;
- экспериментально доказать, что образование шаровых оплавлений медного проводника под действием сверхтока возможно при температуре, которая существенно ниже температуры плавления меди;
- экспериментально подтвердить, что температура медного проводника, подвергнутого токовой перегрузке, различна по его длине;
- подтвердить предположение, что признаки, выявленные на поверхности разрушения медного проводника, подвергнутого протеканию сверхтока, являются устойчивыми и не подвержены изменениям в естественных условиях хранения автомобиля (без умышленного уничтожения признаков).

Материалы и методы исследования

Исследования проводились в Центре опережающего развития “Veritas” Восточно-Казахстанского государственного технического университета им. Д. Серикбаева на растровом электронном микроскопе JSM-6390LV с приставкой для энергодисперсионного микроанализа. Поверхности разрушения медного проводника подвергались анализу без предварительной пробоподготовки.

В настоящей работе рассматривается исследование медного многопроволочного проводника в составе жгута проводов тахографа, подвергнутого токовой перегрузке и изъятых с места пожара, а также результаты экспериментальных исследований.

У автомобиля КамАЗ-65117 в результате электродугового процесса в панели приборов протеканию сверхтока подвергся жгут проводов тахографа. Жгут длиной около 6 м состоял из семи многопроволочных проводников сечением 0,785 мм² каждый (рис. 1, а). У двух многопроволочных проводников

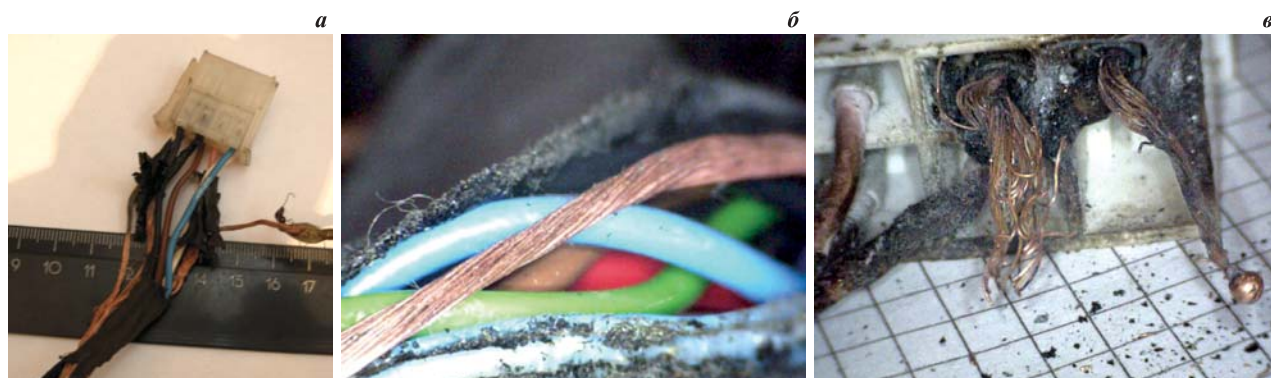


Рис. 1. Вид жгута проводов тахографа, изъятый с места пожара: *а* — сохранение изоляции возле соединительного разъема у всех многопроволочных проводников; *б* — полное отсутствие изоляции у многопроволочного проводника; *в* — разрушение двух медных многопроволочных проводников

Fig. 1. View of the tachograph wiring harness withdrawn from the site of the fire: *a* — maintaining insulation near the connector of all multi-wire conductors; *b* — complete absence of insulation in a multiwire conductor; *v* — destruction of two copper stranded conductors

практически по всей длине изоляция отсутствовала, что подтверждает наличие токовой перегрузки, поскольку короткое замыкание не вызывает выгорания изоляции на длине 6 м. Что особенно характерно, разрушение двух многопроволочных проводников произошло в области технологического изгиба, обусловленного соединительным разъемом. Разрушение двух многопроволочных проводников сопровождалось оплавлением медных проволок в виде шара и косога среза (рис. 1, в). Изоляция у всех многопроволочных проводников сохранилась в непосредственной близости от разъема (см. рис. 1, а).

Вторым объектом исследования являлся одножильный медный проводник без изоляционного покрытия длиной 44 см, сечением $0,64 \text{ мм}^2$. Проводник закрепляли на установке У-1134М и пропускали через него ток. Согласно справочным данным максимально допустимая величина силы тока для медного проводника такого сечения составляет 12–15 А.

Результаты и их обсуждение

В настоящей работе проведено экспериментальное исследование состояния одножильного медно-

го проводника без изоляции, подвергнутого протеканию сверхтока. Одножильный медный проводник был выбран в целях максимальной простоты и наглядности эксперимента, поскольку реальный пример токовой перегрузки демонстрирует многожильный проводник жгута проводов тахографа (см. рис. 1).

На рис. 2 показаны характерные признаки шарового оплавления многожильного проводника жгута проводов тахографа (см. рис. 1, в), которые позволяют идентифицировать причину повреждения как токовую перегрузку.

В работах [9, 10] отмечается, что утончения и утолщения проводника в области шарового оплавления, а также обрыв проволок являются характерными признаками токовой перегрузки.

На рис. 3 показано состояние медного однопроволочного проводника под действием токовой перегрузки. При токе 25 А лак начинает дымиться, при токе 33 А середина проводника приобретает черный цвет, при токе 35 А наблюдаются искры и брызги лака и оксидной пленки (дым), при токе 40 А середина проводника становится красной, затем ток самопроизвольно падает до 38 А. Температура про-



Рис. 2. Оплавление многопроволочного проводника: *а* — общий вид, увеличение $30\times$; *б* — утончения и утолщения, увеличение $43\times$; *в* — сплавление проволочек многопроволочного проводника, увеличение $70\times$

Fig. 2. Burn-off of multiwire explorer: *a* — general view, increase of $30\times$; *b* — thinning and bulges, increase of $43\times$; *v* — meltback of ambages of multiwire explorer, increase of $70\times$

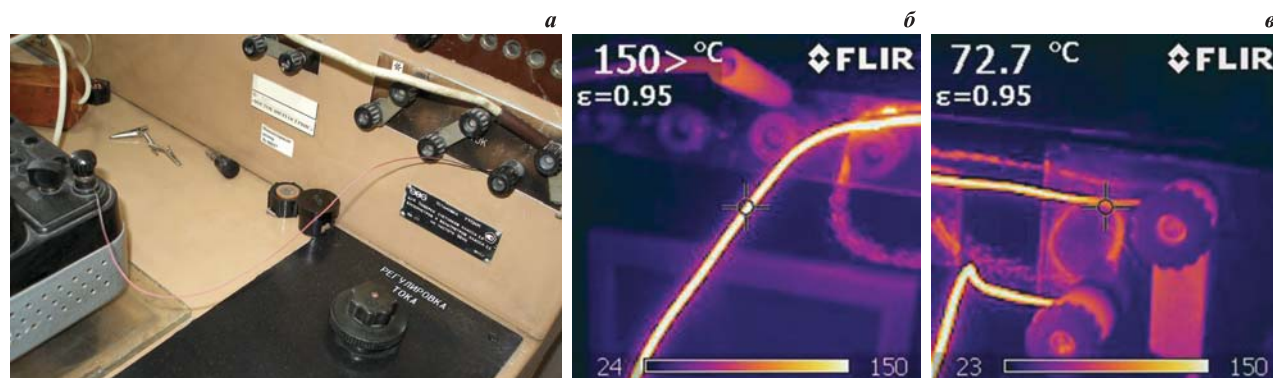


Рис. 3. Однопроволочный проводник под действием токовой перегрузки: *а* — середина проводника красная от нагрева, концы темные; *б* — температура середины проводника; *в* — температура на концах проводника

Fig. 3. Onewire explorer under the action of current overload: *a* — the middle of explorer is red from heating, ends dark; *b* — temperature of middle of explorer; *v* — temperature of ends of explorer

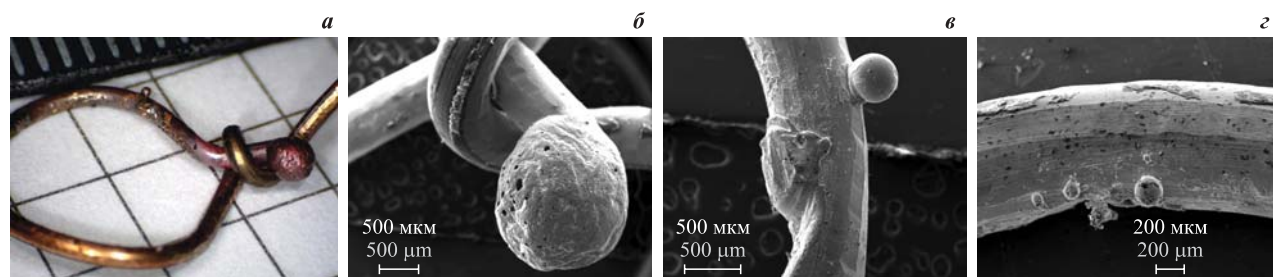


Рис. 4. Шаровые оплавления медного однопроволочного проводника: *а* — общий вид; *б* — шаровое оплавление на торце проводника, увеличение 30[×]; *в* — шаровое оплавление по касательной к поверхности проводника, увеличение 45[×]; *г* — шаровое оплавление по касательной к поверхности проводника, увеличение 60[×]

Fig. 4. Ball burn-offs of copper onewire explorer: *a* — general view; *b* — ball burn-off on the butt end of explorer, increase of 30[×]; *v* — ball burn-off on a tangent to the surface of explorer, increase of 45[×]; *g* — ball burn-off on a tangent to the surface of explorer, increase of 60[×]

водника измерялась дистанционно тепловизором (см. рис. 3). При этом было зафиксировано, что температура на концах проводника не превышала 73 °С, в то время как цвет середины проводника менялся от светло-красного до оранжевого, что соответствует температуре примерно 830–900 °С. Таким образом, экспериментально установлено, что при токовой перегрузке температура по длине проводника распределяется неравномерно.

По аналогии с работами [9, 10] при дальнейшем увеличении силы тока произошло разрушение проводника. Однако проводник разрушился не в точке с максимальной температурой в середине проводника, а возле места соединения с источником питания, где температура существенно ниже, а проводник имеет остаточную пластическую деформацию изгиба (см. рис. 3).

На рис. 4 приведен фрагмент разрушившегося однопроволочного проводника.

Необходимо отметить, что шаровые оплавления образовались не только по касательной к поверхности проводника, но и на его торце (см. рис. 4). На рис. 5 показаны точки микроанализа шаровых оплавлений, приведенных на рис. 4, *а* и 4, *в*, а в табл. 1 и 2 приведены результаты микроанализа.

Необходимо отметить, что ГОСТ 859–2001 допускает содержание в меди марки М1 до 0,005 % железа. Из сравнения данных табл. 1 и 2 следует вывод, что процесс, вызвавший образование шаровых оплавлений, один и тот же, и он не связан с большим переходным сопротивлением или коротким замыканием. Как показано в работе [12], короткое замыкание характеризуется массопереносом, чего в данном случае не наблюдается. Кроме того, следует подчеркнуть, что образование шаровых оплавлений произошло в зоне наиболее низкой температуры проводника, обусловленной действием токовой перегрузки. Это свидетельствует о том, что образование шарового оплавления на торце медного проводника не связано с его нагревом до температуры плавления. Общеизвестно, что текучесть — способность пластичных металлов и тел при постепенном повышении давления уступать действию сдвигающих сил и течь подобно вязким жидкостям. В работе [24] отмечается, что при зарождении очага разрушения твердого тела происходит рост зародыша в жидкой фазе, затем образование пузырьков пара в жидкости при ее кавитации и последующее преобразование в цепочку полостей в твердой фазе. В работе [25] показана

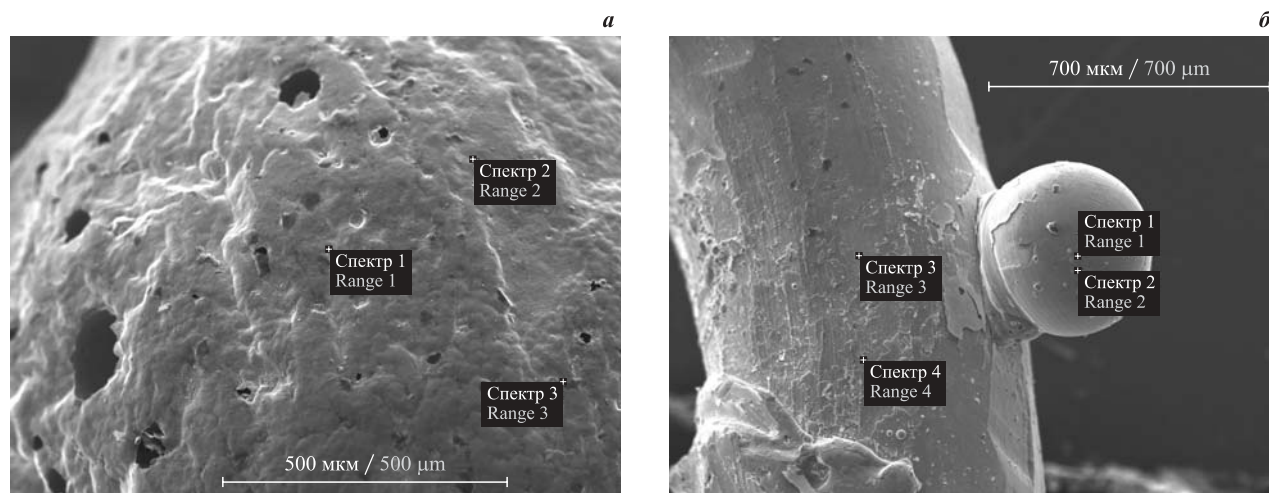


Рис. 5. Точки микроанализа на поверхности повреждения: *а* — шаровое оплавление на торце проводника (см. рис. 4,а); *б* — шаровое оплавление по касательной к поверхности проводника (см. рис. 4,б)

Fig. 5. Points of microanalysis on the surface of damage: *a* — ball burn-off on the butt end of explorer (see Fig. 4,а); *b* — ball burn-off on a tangent to the surface of explorer (see Fig. 4,в)

Таблица 1. Результаты микроанализа участка на рис. 5,а

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

Номер точки измерения Measurement point number	Содержание химического элемента, % масс. Content of chemical element, % by mass		
	O	Fe	Cu
Спектр 1 Range 1	13,13	—	86,87
Спектр 2 Range 2	22,17	1,79	76,04
Спектр 3 Range 3	14,53	—	85,47

роль пластической дисторсии в механизме пластической деформации и разрушении твердых тел.

Таким образом, под действием сверхтока в медном проводнике происходят сложные физические процессы на уровне кристаллической решетки, но данный вопрос будет рассмотрен в отдельной работе.

Полученные данные дополняют результаты, полученные в работах [9, 10]. В них использовалась кратность токовой перегрузки 4–12 и выше, что трудно достижимо в электрической цепи автомобиля.

Следует отметить сопоставимость результатов исследования многопроволочного проводника в составе жгута тахографа и одиночного медного проводника. В этих двух случаях разрушение происходило в области изгиба проводников, и температура в местах подсоединения образцов была ниже, чем в середине, о чем свидетельствует и сохранившаяся изоляция, и результаты измерений тепловизором. Это говорит о том, что при токовой перегрузке проводники разрушаются в первую очередь в местах,

Таблица 2. Результаты микроанализа участка на рис. 5,б

Table 2. The results of the microanalysis of the section shown in Fig. 5,б

Номер точки измерения Measurement point number	Содержание химического элемента, % масс. Content of chemical element, % by mass		
	O	Fe	Cu
Спектр 1 Range 1	1,69	0,95	97,36
Спектр 2 Range 2	14,74	—	84,56
Спектр 3 Range 3	3,29	—	96,71
Спектр 4 Range 4	3,90	—	95,25

подверженных предварительному напряжению (изгиб, надлом и т. п.). Однако это не исключает разрушения проводника в любом другом месте при значительной токовой перегрузке, что является косвенным диагностическим признаком [9, 10].

В работе [10] высказывается также мнение, что под слоем изоляции создается давление, вызывающее движение металла проводника, что приводит к возникновению на поверхности медного проводника образований сферической формы. Кроме того, автором [10] формулируется промежуточный вывод о том, что вздутия на поверхности медного проводника образуются только при наличии на нем целой изоляции. Экспериментальные данные с медным проводником без изоляции показывают, что наличие или отсутствие изоляции не оказывает существенного влияния на механизм образования шаровых оплавлений.

Исследованные образцы медных проводников хранились 3 мес. (что больше среднего срока расследования дел о пожарах), в разных условиях (в помещении без упаковки; в помещении в герметичной упаковке; на открытом воздухе, без доступа воды, в жидком агрегатном состоянии, т. е. без погружения в воду). При сравнении образцов установлено, что выявленные признаки являются устойчивыми и не подвержены изменениям в естественных условиях хранения (без умышленного уничтожения их).

Таким образом, в результате исследования методом растровой микроскопии фрагментов медных проводников, подвергшихся протеканию сверхтока, установлены характерные признаки, позволяющие идентифицировать процесс, который привел к их разрушению (токовая перегрузка, короткое замыкание). Токовая перегрузка характеризуется такими признаками, как вздутия или шаровые оплавления, расположенные в местах изгиба медного проводника, отсутствие признаков массопереноса.

Следует отметить, что если на месте пожара обнаружено соединение проводников, выполненное методом “скрутки”, то, как правило, именно на это обстоятельство указывают, как на причину пожара. Однако настоящим исследованием экспериментально показано, что при протекании сверхтока в деформированном проводнике образуются шаровые оплавления, но это является следствием, а не причиной. Таким образом, соединение медных проводников методом “скрутки” далеко не всегда приводит к возникновению пожароопасного режима. Для установления причинной связи между “скруткой” и пожа-

ром должны иметь место признаки большого переходного сопротивления [26].

Заключение

Экспериментально показано, что разрушение медного проводника автомобильной электрической сети под действием токовой перегрузки происходит в первую очередь в местах, имеющих предварительное напряжение вследствие пластической деформации.

Доказано, что образование шаровых оплавлений медного проводника под действием сверхтока возможно при температуре, которая существенно ниже температуры плавления меди.

Кроме того, наглядно проиллюстрировано, что температура медного проводника, подвергнутого токовой перегрузке, различна по его длине.

Показано также, что растровую микроскопию можно использовать при исследовании фрагментов медных проводников в качестве не только вспомогательного, но и основного метода исследования.

Настоящим исследованием установлено, что признаки, выявленные на поверхностях разрушения медных проводников, являются устойчивыми и не подвержены изменениям в естественных условиях хранения (без умышленного уничтожения их).

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

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Брушлинский Н. Н., Соколов С. В., Вагнер П. Человечество и пожары. — М. : ООО “ИПЦ Маска”, 2007. — 142 с.
2. Quintiere J. G. Fundamentals of fire phenomena. — England, Chichester : John Wiley and Sons Ltd, 2006. DOI: 10.1002/0470091150.fmatter.
3. Beyler C., Carpenter D., Dinunno P. Introduction to fire modeling. Fire Protection Handbook. — 20th ed. — Quincy : National Fire Protection Association, 2008.
4. Severy D., Blaisdell D., Kerkhoff J. Automotive collision fires // SAE Technical Paper 741180, 1974. DOI: 10.4271/741180.
5. Katsuhiro Okamoto, Norimichi Watanabe, Yasuaki Hagimoto, Tadaomi Chigira, Ryoji Masano, Hitoshi Miura, Satoshi Ochiai, Hideki Satoh, Yohsuke Tamura, Kimio Hayano, Yasumasa Maeda, Jinji Suzuki. Burning behavior of sedan passenger cars // Fire Safety Journal. — 2009. — Vol. 44, No. 3. — P. 301–310. DOI: 10.1016/j.firesaf.2008.07.001.
6. Чешко И. Д., Скодтаев С. В., Теплякова Т. Д. Классификация аварийных пожароопасных режимов работы электросетей автомобилей и схема выявления их следов после пожара // Проблемы управления рисками в техносфере. — 2019. — № 1(49). — С. 107–115.
7. Богатищев А. И. Комплексные исследования пожароопасных режимов в сетях электрооборудования автотранспортных средств : дис. ... канд. техн. наук. — М. : Академия ГПС МЧС России, 2002. — 269 с.
8. Чешко И. Д. Экспертиза пожаров (объекты, методы, методики исследования). — 2-е изд., стереотип. — СПб. : СПб ИПБ МВД РФ, 1997. — 562 с.

9. Чешко И. Д., Мокряк А. Ю., Скодтаев С. В. Механизм формирования следов протекания сверхтоков по медному проводнику // Вестник Санкт-Петербургского университета Государственной противопожарной службы МЧС России. — 2015. — № 1. — С. 41–46.
10. Мокряк А. Ю. Установление природы оплавлений медных проводников и латунных токоведущих изделий при экспертизе пожаров на объектах энергетики : дис. ... канд. техн. наук. — М. : Академия ГПС МЧС России, 2018. — 140 с.
11. Смельков Г. И., Чешко И. Д., Плотников В. Г. Экспериментальное моделирование пожароопасных аварийных режимов в электрических проводах // Вестник Санкт-Петербургского университета Государственной противопожарной службы МЧС России. — 2017. — № 3. — С. 121–128.
12. Недобитков А. И. Особенности короткого замыкания в автомобильной электрической сети // Пожаровзрывобезопасность/Fire and Explosion Safety. — 2018. — Т. 27, № 5. — с. 34–49. DOI: 10.18322/PVB.2018.27.05.34-49.
13. Смельков Г. И. Пожарная безопасность электропроводок. — М. : ООО “Кабель”, 2009. — 328 с.
14. Babrauskas V. Arc beads from fires: Can ‘cause’ beads be distinguished from ‘victim’ beads by physical or chemical testing? // Journal of Fire Protection Engineering. — 2004. — Vol. 14, No. 2. — P. 125–147. DOI: 10.1177/1042391504036450.
15. Delplace M., Vos E. Electric short circuits help the investigator determine where the fire started // Fire Technology. — 1983. — Vol. 19, No. 3. — P. 185–191. DOI: 10.1007/bf02378698.
16. Wright S. A., Loud J. D., Blanchard R. A. Globules and beads: what do they indicate about small-diameter copper conductors that have been through a fire? // Fire Technology. — 2015. — Vol. 51, No. 5. — P. 1051–1070. DOI: 10.1007/s10694-014-0455-9.
17. Babrauskas V. Arc mapping: a critical review // Fire Technology. — 2018. — Vol. 54, Issue 3. — P. 749–780. DOI: 10.1007/s10694-018-0711-5.
18. Hoffmann D. J., Swonder E. M., Burr M. T. Arc faulting in household appliances subjected to a fire test // Fire Technology. — 2016. — Vol. 52, Issue 6. — P. 1659–1666. DOI: 10.1007/s10694-015-0556-0.
19. Kuan-Heng Liu, Yung-Hui Shih, Guo-Ju Chen, Jaw-Min Chou. Microstructural study on oxygen permeated arc beads // Journal of Nanomaterials. — 2015. — Article ID 373861. — 8 p. DOI: 10.1155/2015/373861.
20. Lewis K. H., Templeton B. Morphological variation in copper arcs during post-arc fire heating // Proceedings of 3rd International Symposium on Fire Investigation Science & Technology. — Sarasota : National Association of Fire Investigators, 2008. — P. 183–195.
21. Murray I., Ajersch F. New metallurgical techniques applied to fire investigation // Fire & Materials '2009. — London : Interscience Communications Ltd., 2009. — P. 857–869.
22. Carey N. J. Developing a reliable systematic analysis for arc fault mapping : Ph. D. diss. — Strathclyde, United Kingdom : University of Strathclyde, 2009.
23. Roby R. J., McAllister J. Forensic investigation techniques for inspecting electrical conductors involved in fire // Final Technical Report for Award No. 239052. — Columbia : Combustion Science & Engineering, Inc., 2012.
24. Васильев Л. С. Структурно-фазовые превращения и критические явления при интенсивном пластическом деформировании и разрушении металлов и сплавов : дис. ... д-ра физ.-мат. наук. — Ижевск, 2010. — 405 с.
25. Панин В. Е., Егорушкин В. Е., Панин А. В., Чернявский А. Г. Пластическая дисторсия — фундаментальный механизм в нелинейной мезомеханике пластической деформации и разрушения твердых тел // Физическая мезомеханика. — 2016. — Т. 19, № 1. — С. 31–46.
26. Экспертное исследование после пожара контактных узлов электрооборудования в целях выявления признаков больших переходных сопротивлений : метод. реком. / К. Б. Лебедев, А. Ю. Мокряк, И. Д. Чешко. — М. : ВНИИПО, 2008. — 29 с.

REFERENCES

1. N. N. Brushlinskiy, S. V. Sokolov, P. Wagner. *Chelovechestvo i pozhary* [Humanity and fires]. Moscow, IPTs Maska Publ., 2007. 142 p. (in Russian).
2. J. G. Quintiere. *Fundamentals of fire phenomena*. England, Chichester, John Wiley and Sons Ltd, 2006. DOI: 10.1002/0470091150.fmatter.
3. C. Beyler, D. Carpenter, P. Dinunno. *Introduction to fire modeling*. Fire Protection Handbook. 20th ed. Quincy, National Fire Protection Association, 2008.
4. D. Severy, D. Blaisdell, J. Kerkhoff. Automotive collision fires. *SAE Technical Paper 741180*, 1974. DOI: 10.4271/741180.

5. Katsuhiro Okamoto, Norimichi Watanabe, Yasuaki Hagimoto, Tadaomi Chigira, Ryoji Masano, Hitoshi Miura, Satoshi Ochiai, Hideki Satoh, Yohsuke Tamura, Kimio Hayano, Yasumasa Maeda, Jinji Suzuki. Burning behavior of sedan passenger cars. *Fire Safety Journal*, 2009, vol. 44, no. 3, pp. 301–310. DOI: 10.1016/j.firesaf.2008.07.001.
6. I. D. Cheshko, S. V. Skodtaye, T. D. Teplyakova. Classification of emergency fire-hazardous operations of electric networks of cars and the scheme of identifying their trails after the fire. *Problemy upravleniya riskami v tekhnosfere / Problems of Technosphere Risk Management*, 2019, no. 1(49), pp. 107–115 (in Russian).
7. A. I. Bogatishchev. *Comprehensive research of fire hazardous modes in mains of electrical equipment of vehicles*. Cand. Sci. (Eng.) Diss. Moscow, State Fire Academy of Emercom of Russia Publ., 2002. 269 p. (in Russian).
8. I. D. Cheshko. *Ekspertiza pozharov (obyekty, metody, metodiki issledovaniya)* [Examination of fire (objects, methods, methods of research)]. Saint Petersburg, Saint Petersburg Institute of Fire Safety of Ministry of the Interior of Russian Federation Publ., 1997. 562 p. (in Russian).
9. I. D. Cheshko, A. Yu. Mokryak, S. V. Skodtaye. Formation mechanism of excess currents passage traces in copper conductors. *Vestnik Sankt-Peterburgskogo universiteta Gosudarstvennoy protivopozharnoy sluzhby MChS Rossii / Herald of St. Petersburg University of State Fire Service of Emercom of Russia*, 2015, no. 1, pp. 41–46 (in Russian).
10. A. Yu. Mokryak. *Determination of the nature of melting of copper conductors and brass current-carrying products in the examination of fires at power facilities*. Cand. Sci. (Eng.) Diss. Moscow, State Fire Academy of Emercom of Russia Publ., 2018. 140 p. (in Russian).
11. G. I. Smelkov, I. D. Cheshko, V. G. Plotnikov. Experimental modeling of fire-alarm emergency modes in electrical wires. *Vestnik Sankt-Peterburgskogo universiteta Gosudarstvennoy protivopozharnoy sluzhby MChS Rossii / Herald of St. Petersburg University of State Fire Service of Emercom of Russia*, 2017, no. 3, pp. 121–128 (in Russian).
12. A. I. Nedobitkov. Specific features of short circuit in automobile electrical system. *Pozharovzryvo-bezopasnost/Fire and Explosion Safety*, 2018, vol. 27, no. 5, pp. 34–49 (in Russian). DOI: 10.18322/PVB.2018.27.05.34-49.
13. G. I. Smelkov. *Pozharnaya bezopasnost elektroprovodok* [Fire safety of wirings]. Moscow, Cable LLC. Publ., 2009. 328 p. (in Russian).
14. V. Babrauskas. Arc beads from fires: Can ‘cause’ beads be distinguished from ‘victim’ beads by physical or chemical testing? *Journal of Fire Protection Engineering*, 2004, vol. 14, no. 2, pp. 125–147. DOI: 10.1177/1042391504036450.
15. M. Delplace, E. Vos. Electric short circuits help the investigator determine where the fire started. *Fire Technology*, 1983, vol. 19, no. 3, pp. 185–191. DOI: 10.1007/bf02378698.
16. S. A. Wright, J. D. Loud, R. A. Blanchard. Globules and beads: what do they indicate about small-diameter copper conductors that have been through a fire? *Fire Technology*, 2015, vol. 51, no. 5, pp. 1051–1070. DOI: 10.1007/s10694-014-0455-9.
17. V. Babrauskas. Arc mapping: a critical review. *Fire Technology*, 2018, vol. 54, issue 3, pp. 749–780. DOI: 10.1007/s10694-018-0711-5.
18. D. J. Hoffmann, E. M. Swonder, M. T. Burr. Arc faulting in household appliances subjected to a fire test. *Fire Technology*, 2016, vol. 52, issue 6, pp. 1659–1666. DOI: 10.1007/s10694-015-0556-0.
19. Kuan-Heng Liu, Yung-Hui Shih, Guo-Ju Chen, Jaw-Min Chou. Microstructural study on oxygen permeated arc beads. *Journal of Nanomaterials*, 2015, article ID 373861. 8 p. DOI: 10.1155/2015/373861.
20. K. H. Lewis, B. Templeton. Morphological variation in copper arcs during post-arc fire heating. In: *Proceedings of 3rd International Symposium on Fire Investigation Science & Technology*. Sarasota, National Association of Fire Investigators, 2008, pp. 183–195.
21. I. Murray, F. Ajersch. New metallurgical techniques applied to fire investigation. In: *Fire & Materials '2009*. London, Interscience Communications Ltd., 2009, pp. 857–869.
22. N. J. Carey. *Developing a reliable systematic analysis for arc fault mapping*. Ph. D. Diss. Strathclyde, United Kingdom, University of Strathclyde, 2009.
23. R. J. Roby, J. McAllister. Forensic investigation techniques for inspecting electrical conductors involved in fire. In: *Final Technical Report for Award No. 239052*. Columbia, Combustion Science & Engineering, Inc., 2012.
24. L. S. Vasilyev. *Structural-phase transformations and critical phenomena during intensive plastic deformation and destruction of metals and alloys*. Dr. Sci. (Phys.-Math.) Diss. Izhevsk, 2010. 405 p. (in Russian).

25. V. E. Panin, R. W. Armstrong. Hall-petch analysis for temperature and strain rate dependent deformation of polycrystalline lead. *Physical Mesomechanics*, 2016, vol. 19, no. 1, pp. 35–40.
26. K. B. Lebedev, A. Yu. Mokryak, I. D. Cheshko. *Ekspertnoye issledovaniye posle pozhara kontaktnykh uzlov elektrooborudovaniya v tselyakh vyyavleniya priznakov bolshikh perekhodnykh soprotivleniy. Metodicheskiye rekomendatsii* [Expert research after the fire of the contact points of electrical equipment in order to identify signs of large transient resistance: Methodological recommendations]. Moscow, VNIPO Publ., 2008. 29 p. (in Russian).

Поступила 22.04.2019; после доработки 06.06.2019; принята к публикации 12.06.2019
Received 22 April 2019; received in revised form 6 June 2019; accepted 12 June 2019

Информация об авторе

НЕДОБИТКОВ Александр Игнатьевич, канд. техн. наук, доцент, кафедра информатики и математики, Казахский гуманитарно-юридический инновационный университет, г. Усть-Каменогорск, Республика Казахстан; ORCID: 0000-0003-4605-9668; e-mail: a.nedobitkov@mail.ru

Information about the author

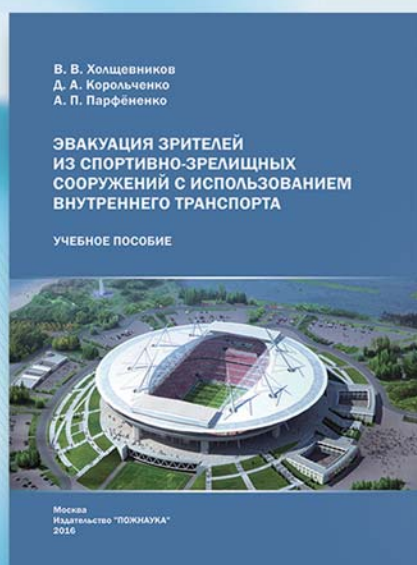
Alexsandr I. NEDOBITKOV, Cand. Sci. (Eng.), Associate Professor, Department of Informatics and Mathematics, Kazakh Humanitarian Law Innovative University, Ust-Kamenogorsk, Kazakhstan; ORCID: 0000-0003-4605-9668; e-mail: a.nedobitkov@mail.ru



ООО «Издательство «ПОЖНАУКА»

предлагает Вашему вниманию

Учебное пособие



Холщевников В. В.
Корольченко Д. А.
Парфёненко А. П.

ЭВАКУАЦИЯ ЗРИТЕЛЕЙ ИЗ СПОРТИВНО-ЗРЕЛИЩНЫХ СООРУЖЕНИЙ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ВНУТРЕННЕГО ТРАНСПОРТА

М. : Изд-во «ПОЖНАУКА». — 88 с.

Впервые в практике архитектурно-строительного преподавания рассмотрена методология учета важнейшего функционального процесса — движения людских потоков с использованием эскалаторов и лифтовых установок при различных режимах эксплуатации зданий, включая чрезвычайную ситуацию пожара, на примере реального объекта с большим количеством находящихся в нем людей.

Для заказа книги пишите нам по адресу:

121352, г. Москва, а/я 6,
или звоните по телефону
8 (495) 228-09-03.

Вы можете также оформить заказ через электронную почту:
mail@firepress.ru.

<https://doi.org/10.18322/PVB.2019.28.04.51-62>

УДК 614.8(100)“20”

Сколько человек погибает при пожарах в мире?

© Н. Н. Брушлинский, С. В. Соколов✉, О. В. Иванова

Академия ГПС МЧС России (Россия, 129366, г. Москва, ул. Бориса Галушкина, 4)

РЕЗЮМЕ

В статье приведена информация о смертности и травмировании людей при пожарах в мире в начале XXI в. Выполнена оценка общего числа погибших и травмированных людей при пожарах в мире: оно составило соответственно 100–120 и 300–350 тыс. чел. в год по данным Центра пожарной статистики Международной ассоциации пожарно-спасательных служб (ЦПС КТИФ). ЦПС КТИФ использует данные, которые предоставляют противопожарные службы различных стран мира. Приведена оценка риска гибели людей (по 54 странам мира) и травмирования (по 43 странам мира) при пожарах за период 2013–2017 гг. Показано, что риск получить травму при пожаре в 3–4 раза превышает риск гибели человека при пожаре. Приведены данные по смертности в мире в результате воздействия огня, тепла и горячих субстанций по оценкам Всемирной организации здравоохранения (ВОЗ) — в среднем 189 тыс. чел. в год (за период 2000–2016 гг.). Проведено сравнение статистических данных по гибели людей, подвергшихся воздействию огня, тепла и горячих субстанций, по материалам ВОЗ и при пожарах по данным ЦПС КТИФ в 35 странах в 2012 г. и в 17 странах мира в 2016 г. Вся совокупность данных для представленных стран в итоге различается на 35–45 %. Впервые получены достаточно надежные оценки гибели и травмирования людей при пожарах в мире.

Ключевые слова: статистика пожаров; статистика смертности; гибель и травмирование при пожарах; риск смертности при пожарах; риск травмирования при пожарах.

Для цитирования: Брушлинский Н. Н., Соколов С. В., Иванова О. В. Сколько человек погибает при пожарах в мире? // Пожаровзрывобезопасность/Fire and Explosion Safety. — 2019. — Т. 28, № 4. — С. 51–62. DOI: 10.18322/PVB.2019.28.04.51-62.

✉ Соколов Сергей Викторович, e-mail: albrus-ssv@yandex.ru

How many fire deaths are in the world?

© Nikolay N. Bruslinskiy, Sergey V. Sokolov✉, Oksana V. Ivanova

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

ABSTRACT

The article provides information about the fire deaths and fire injuries in the world at the beginning of the XXI century. An estimate of the total number of fire deaths and fire injuries on Earth was made. According to the data of Center of Fire Statistics (CFS) of International Association of Fire and Rescue services (CTIF) total number of fire deaths in the world can be estimated at 100–120 thous. inh. per year and total number of fire injuries at 300–350 thous. inh. per year. CFS CTIF received data from fire services of the countries. The values of the fire death risk (by 54 countries) and fire injury risk (by 43 countries) are presented. It is shown that the fire injury risk is 3–4 times higher than the fire death risk. The data on mortality in the world from fire, heat and hot substances according to the World Health Organization (WHO) is given — an average of 189 thousand people per year (for the period of 2000–2016). A comparison of statistics on the death of people from fire, heat and hot substances according to WHO data and fire deaths according to the CPS CTIF in 35 countries in 2012 and in 17 countries of the world in 2016 was made. The total data set for the countries represented varies by 35–45 %. For the first time, sufficiently reliable estimates of fire deaths and fire injuries in the world were obtained.

Keywords: fire statistics; mortality statistics; fire injuries and fire deaths; fire death risk; fire injury risk.

For citation: N. N. Bruslinskiy, S. V. Sokolov, O. V. Ivanova. How many fire deaths are in the world? *Pozharovzryvobezopasnost/Fire and Explosion Safety*, 2019, vol. 28, no. 4, pp. 51–62 (in Russian). DOI: 10.18322/PVB.2019.28.04.51-62.

✉ Sergey Viktorovich Sokolov, e-mail: albrus-ssv@yandex.ru

Введение

На вопрос, интересующий и специалистов, и простых людей, сколько человек погибает при пожарах в мире, еще несколько десятилетий тому назад ответить было невозможно из-за отсутствия необходимой информации. В настоящее время ситуация изменилась коренным образом и стало возможным дать

вполне обоснованные оценки ежегодного числа погибших при пожаре людей на нашей планете.

Этому способствовали следующие обстоятельства. Во-первых, в 1948 г. при ООН была создана Всемирная организация здравоохранения (ВОЗ), одной из функций которой является “мониторинг ситуаций и оценка тенденций в области здравоохранения”.

Сейчас в эту организацию входят 194 страны. Штаб-квартира ВОЗ находится в Женеве. ВОЗ ежегодно выпускает различные отчеты, в том числе о смертности людей по различным причинам. В частности, эта организация ведет учет людей, “погибших от огня, тепла и горячих субстанций”.

В 1995 г. при Международной ассоциации пожарных и спасательных служб (КТИФ) был создан Центр пожарной статистики (ЦПС). Он изучает обстановку с пожарами в разных странах и городах мира и различные аспекты деятельности противопожарных служб. ЦПС выпускает ежегодные отчеты на трех языках — русском, английском, немецком, а ряд отчетов дополнительно — на венгерском, польском, испанском, турецком и арабском языках.

В частности, ЦПС КТИФ изучает динамику гибели и травмирования гражданских лиц при пожарах, а также гибели и травмирования пожарных, находящихся на боевом дежурстве. Сейчас в КТИФ входят около 40 стран. Штаб-квартира находится в Париже.

Объединение и сравнительный анализ данных из отчетов ВОЗ и ЦПС КТИФ позволяют впервые получить достаточно обоснованные оценки гибели людей при пожарах в мире. Этому и посвящена настоящая статья.

1. Анализ данных ЦПС КТИФ

Сначала проанализируем данные ЦПС КТИФ, что облегчит проведение сравнения их с данными ВОЗ и получение итоговых оценок.

Для этого изучим данные табл. 1–4 и рис. 1 [1–15]. В табл. 1 приведена динамика гибели людей при пожарах в 54 странах за пятилетний период (2013–2017 гг.). Население этих стран составляло около 3 млрд. чел., т. е. 43 % всего народонаселения Земли [1–3].

Из табл. 1 видим, что в самой крупной стране — Индии в среднем ежегодно погибают при пожарах примерно 20 тыс. чел. (больше всех в мире по абсолютной величине), а в маленьком Лихтенштейне гибели людей при пожарах не зарегистрировано. Подчеркнем, что это — официальные данные пожарных бригад.

Для сравнительного анализа введем относительную характеристику — число погибших при пожаре в год на 100 тыс. чел. (это — риск для человека погибнуть при пожаре за единицу времени, который мы обозначим $R_{\Gamma}^{\text{ЦПС}}$).

Из рис. 1 следует, что в среднем (за пять лет) больше всего людей при пожаре погибло в Белоруссии ($R_{\Gamma}^{\text{ЦПС}} = 6,59$ жертв/(год · 10^5 чел.)) и России ($R_{\Gamma}^{\text{ЦПС}} = 6,37$ жертв/(год · 10^5 чел.)). Далее идут постсоветские республики — Украина, Латвия, Литва, Эстония, Молдова и Казахстан.

Самые маленькие значения риска зафиксированы во Вьетнаме, Бангладеше, Словении, Сингапуре и Лихтенштейне.

Из итоговой (нижней) строки в табл. 1 видим, что в среднем в 54 странах ежегодно погибали около 42 тыс. чел., а значение риска $R_{\Gamma}^{\text{ЦПС}}$ составило 1,4 жертв/(год · 10^5 чел.).

Теперь грубая ориентировочная оценка позволяет нам предположить, что во всех 220 странах мира, общая численность населения которых в 2015 г. составляла 7,3 млрд. чел., ежегодно погибали при пожарах около 100 тыс. чел.

Рассмотрим теперь данные по травмированию людей при пожарах. В табл. 2 приведена динамика травмирования людей при пожарах в 43 странах за 2013–2017 гг. Больше всего людей получили травмы при пожарах в США (15 326 чел.), России (10 470 чел.), Великобритании (9544 чел.) и во Франции (7531 чел.), а меньше всего — в Брунее и на Кипре.

Здесь полезно ввести новую характеристику — риск для человека получить травму при пожаре в единицу времени, т. е. R_{Γ} (травмир./((год · 10^5 чел.))). Самое большое значение риска R_{Γ} имеет Великобритания (14,96), затем Финляндия (13,26), Чехия (12,25) и Иордания (12,01), а самые низкие значения — Вьетнам (0,20), Мьянма (0,34), Непал (0,35) и Бангладеш (0,39).

Это значит, что страны Европы (не считая Иордании) лидируют по этому показателю, а страны Азии — наиболее благополучны в этом плане.

Из нижней итоговой строки табл. 2 видим, что всего в 43 исследованных странах с общей численностью населения 1,44 млрд. чел. (т. е. около 20 % населения планеты) ежегодно в среднем при пожарах получали травмы около 70 тыс. чел.

Тогда, опять-таки ориентировочно, можно сказать, что ежегодно в мире при пожарах получают травмы примерно 350 тыс. чел., а риск получить травму при пожаре равен 5 травмир./((год · 10^5 чел.)), т. е. в 3–4 раза больше, чем риск погибнуть при пожаре.

В заключение рассмотрим вопрос о гибели и травмировании пожарных на боевом дежурстве (см. табл. 3 и 4).

В табл. 3 приведены данные по гибели пожарных в 30 странах мира за 2013–2017 гг. В этих странах с общей численностью населения примерно 1 млрд. чел. ежегодно в среднем погибали около 100 пожарных. Причем подавляющая часть погибших приходится на США и отчасти на Россию.

В табл. 4 представлены данные по травмированию пожарных на боевом дежурстве. В ней собраны данные из 27 стран с общей численностью населения 0,9 млрд. чел. В среднем ежегодно травмы получали около 65 тыс. пожарных, причем почти все 100 %

Таблица 1. Динамика гибели при пожарах в странах мира за 2013–2017 гг. [1]

Table 1. Trends in fire deaths in the countries for 2013–2017 [1]

№ п/п No.	Страна Country	Население, тыс. чел. Population, thous. inh.	Число погибших, чел., по годам Number of fire deaths per year, inh.					Среднее число погибших, чел. Average number of fire deaths, inh.		
			2013	2014	2015	2016	2017	в год per year	на 100 тыс. чел. per 100 thous. inh.	на 100 пожаров per 100 fires
1	Индия / India	1 267 500	22 177	19 513	17 700	—	—	19 797	1,56	—
2	США / USA	327 167	3420	3275	3280	3390	3400	3353	1,02	0,26
3	Бангладеш / Bangladesh	154 331	161	70	68	—	—	100	0,06	0,56
4	Россия / Russia	146 544	10 601	10 138	9405	8749	7816	9342	6,37	6,47
5	Япония / Japan	128 130	1625	1678	1563	1452	—	1580	1,23	3,77
6	Вьетнам / Vietnam	93 000	45	90	62	98	96	78	0,08	2,68
7	Германия / Germany	82 218	439	372	367	—	—	393	0,48	0,22
8	Таиланд / Thailand	70 498	110	—	—	—	—	110	0,16	—
9	Франция / France	66 628	321	280	335	289	277	300	0,45	0,10
10	Великобритания / Great Britain	63 786	350	322	325	367	325	338	0,53	0,17
11	Италия / Italy	61 000	196	141	222	295	288	228	0,37	0,10
12	Мьянма / Myanmar	51 486	83	60	—	—	—	72	0,14	4,33
13	Испания / Spain	46 570	132	162	143	175	212	165	0,35	0,13
14	Украина / Ukraine	42 486	2494	2246	1948	1872	1819	2076	4,89	2,82
15	Польша / Poland	38 454	515	493	512	488	475	497	1,29	0,35
16	Канада / Canada	35 544	141	150	—	—	—	146	0,41	0,40
17	Малайзия / Malaysia	31 800	72	139	158	142	—	128	0,40	0,29
18	Непал / Nepal	30 430	59	67	—	—	—	63	0,21	6,37
19	Тайвань / Taiwan	23 069	92	124	117	169	—	126	0,54	7,81
20	Румыния / Romania	20 121	—	—	646	258	241	382	1,90	1,31
21	Казахстан / Kazakhstan	17 500	455	401	386	371	342	391	2,23	2,74
22	Нидерланды / Netherlands	17 082	—	75	81	42	40	60	0,35	0,06
23	Греция / Greece	10 788	33	—	—	—	—	33	0,31	0,12
24	Бельгия / Belgium	10 700	48	—	—	—	—	48	0,45	0,23
25	Чехия / Czech	10 610	111	114	115	124	92	111	1,05	0,64
26	Швеция / Sweden	10 120	96	—	110	—	110	105	1,04	0,42
27	Венгрия / Hungary	9798	112	94	108	114	121	110	1,12	0,53
28	Иордания / Jordan	9722	35	35	52	28	28	36	0,37	0,14
29	Беларусь / Belarus	9492	783	737	578	538	490	625	6,59	9,35
30	Австрия / Austria	8773	20	—	—	—	—	20	0,23	0,04
31	Израиль / Israel	8300	—	—	—	19	—	19	0,23	0,04
32	Болгария / Bulgaria	7365	106	103	109	129	146	119	1,61	0,38
33	Сербия / Serbia	7187	62	73	—	—	—	68	0,94	0,35
34	Дания / Denmark	5756	70	84	68	52	61	67	1,16	0,49
35	Сингапур / Singapore	5612	4	—	—	1	1	2	0,04	0,05
36	Киргизстан / Kyrgyzstan	5522	80	80	48	80	—	72	1,30	1,75
37	Финляндия / Finland	5474	58	86	74	82	61	72	1,32	0,58
38	Норвегия / Norway	5109	62	54	—	—	—	58	1,14	0,73
39	Коста Рика / Costa Rica	4973	23	13	12	18	14	16	0,32	0,08
40	Новая Зеландия / New Zealand	4748	—	—	13	19	14	15	0,32	0,15
41	Ирландия / Ireland	4500	24	37	41	20	41	33	0,72	0,14
42	Хорватия / Croatia	4290	—	21	24	22	32	25	0,58	0,10
43	Кувейт / Kuwait	4137	17	19	38	50	31	31	0,75	0,29
44	Молдова / Moldova	3553	120	118	107	—	—	115	3,24	2,38
45	Монголия / Mongolia	3201	53	61	59	60	44	55	1,73	2,90
46	Армения / Armenia	2973	—	—	—	32	6	19	0,64	0,48
47	Литва / Lithuania	2848	160	125	125	101	103	123	4,31	2,19
48	Словения / Slovenia	2064	0	0	3	—	—	1	0,05	0,01
49	Катар / Qatar	1975	4	18	18	1	—	10	0,52	0,18
50	Латвия / Latvia	1950	104	94	88	95	79	92	4,72	7,49
51	Эстония / Estonia	1314	47	54	50	39	38	46	3,47	0,43
52	Кипр / Cyprus	858	5	—	—	—	—	5	0,58	0,09
53	Бруней / Brunei	430	0	7	4	3	4	4	0,84	0,11
54	Лихтенштейн / Liechtenstein	37	0	0	0	—	—	0	0,00	0,00
Итого / Total		2 989 523	45 725	41 823	39 162	19 784	16847	41 874	1,40	1,18

Таблица 2. Динамика травмирования при пожарах в странах мира за 2013–2017 гг. [1]**Table 2.** Trends in fire injuries in the countries for 2013–2017 [1]

№ п/п No.	Страна Country	Население, тыс. чел. Population, thous. inh.	Число травмированных, чел., по годам Number of fire injuries per year, inh.					Среднее число травмированных, чел. Average number of fire injuries, inh.		
			2013	2014	2015	2016	2017	в год per year	на 100 тыс. чел. per 100 thous. inh.	на 100 пожаров per 100 fires
1	США / USA	327 167	15 925	15 775	15 700	14 560	14 670	15 326	4,68	1,17
2	Бангладеш / Bangladesh	154 331	1385	210	216	–	–	604	0,39	3,40
3	Россия / Russia	146 544	11 132	10 997	10 962	9905	9355	10 470	7,14	7,25
4	Япония / Japan	128 130	6858	6560	–	–	–	6709	5,24	15,99
5	Вьетнам / Vietnam	93 000	146	143	264	180	203	187	0,20	6,42
6	Франция / France	66 628	14 068	13 703	–	1127	1226	7531	11,30	2,60
7	Великобритания / Great Britain	63 786	10 300	9754	9233	9534	8897	9544	14,96	4,78
8	Италия / Italy	61 000	691	955	1263	1609	–	1130	1,85	0,47
9	Мьянма / Myanmar	51 486	168	181	–	–	–	175	0,34	10,57
10	Украина / Ukraine	42 673	1585	1450	1357	1351	1474	1443	3,38	1,96
11	Польша / Poland	38 413	–	–	–	–	4328	4328	11,27	3,06
12	Малайзия / Malaysia	31 800	165	389	1471	–	–	675	2,12	1,51
13	Непал / Nepal	30 430	115	98	–	–	–	107	0,35	10,76
14	Тайвань / Taiwan	23 069	189	244	733	261	–	357	1,55	22,20
15	Румыния / Romania	20 121	–	–	818	659	702	726	3,61	2,49
16	Казахстан / Kazakhstan	17 500	1034	1011	963	566	801	875	5,00	6,14
17	Греция / Greece	10 788	89	–	–	–	–	89	0,82	0,32
18	Бельгия / Belgium	10 700	1076	–	–	–	–	1076	10,06	5,07
19	Чехия / Czech	10 610	1189	1179	1449	1291	1392	1300	12,25	7,45
20	Швеция / Sweden	10 120	630	–	–	–	414	522	5,16	2,06
21	Венгрия / Hungary	9798	774	729	835	811	897	809	8,26	3,91
22	Иордания / Jordan	9722	1024	1133	1454	1139	1089	1168	12,01	4,47
23	Беларусь / Belarus	9492	471	421	281	282	264	344	3,62	5,14
24	Болгария / Bulgaria	7365	305	263	339	298	301	301	4,09	0,95
25	Сербия / Serbia	7187	398	338	–	–	–	368	5,12	1,89
26	Сингапур / Singapore	5612	95	–	–	62	60	72	1,29	1,69
27	Киргизстан / Kyrgyzstan	5522	80	51	54	77	–	66	1,19	1,59
28	Финляндия / Finland	5474	621	851	665	795	696	726	13,26	5,80
29	Норвегия / Norway	5109	306	284	–	–	–	295	5,77	3,69
30	Коста Рика / Costa Rica	4973	88	67	66	67	71	72	1,44	0,37
31	Новая Зеландия / New Zealand	4748	–	–	125	–	–	125	2,63	1,24
32	Хорватия / Croatia	4290	–	71	84	104	117	94	2,19	0,39
33	Кувейт / Kuwait	4137	138	175	139	199	265	183	4,43	1,72
34	Молдова / Moldova	3553	47	53	45	–	–	48	1,36	1,00
35	Монголия / Mongolia	3201	–	64	44	–	–	54	1,69	2,82
36	Армения / Armenia	2973	–	–	40	46	54	47	1,57	1,18
37	Литва / Lithuania	2848	209	193	206	204	181	199	6,97	3,55
38	Словения / Slovenia	2064	63	53	21	–	–	46	2,21	0,40
39	Катар / Qatar	1975	102	93	73	43	–	78	3,94	1,37
40	Латвия / Latvia	1950	252	283	304	302	381	304	15,61	24,77
41	Эстония / Estonia	1314	99	61	76	110	102	90	6,82	0,85
42	Кипр / Cyprus	858	26	–	–	–	–	26	3,03	0,46
43	Бруней / Brunei	444	22	12	5	5	8	10	2,34	0,31
Итого / Total		1 442 905	71 865	67 844	49 285	45 587	47 948	68 697	4,76	1,94

Таблица 3. Динамика гибели пожарных в странах мира за 2013–2017 гг. [1]**Table 3.** Trends in firefighter deaths in the countries for 2013–2017 [1]

№ п/п No.	Страна Country	Население, тыс. чел. Population, thous. inh.	Число погибших, чел., по годам Number of firefighter deaths by years, inh.					Среднее число погибших в год, чел. Average number of fire- fighter deaths per year, inh.
			2013	2014	2015	2016	2017	
1	США / USA	327 167	97	64	68	69	60	71,60
2	Россия / Russia	146 544	15	19	12	19	–	–
3	Япония / Japan	128 130	7	9	–	–	–	–
4	Франция / France	66 628	8	–	–	–	–	–
5	Украина / Ukraine	42 673	2	1	5	1	2	2,20
6	Польша / Poland	38 413	0	0	0	–	2	–
7	Румыния / Romania	20 121	–	–	1	1	0	–
8	Казахстан / Kazakhstan	17 500	–	–	–	–	2	–
9	Нидерланды / Netherlands	17 082	–	1	0	–	–	–
10	Греция / Greece	10 788	0	–	–	–	–	–
11	Бельгия / Belgium	10 700	0	–	–	–	–	–
12	Чехия / Czech	10 610	0	0	0	0	2	0,40
13	Швеция / Sweden	10 120	1	–	1	–	0	–
14	Венгрия / Hungary	9798	–	0	0	0	0	–
15	Иордания / Jordan	9722	–	–	0	0	1	–
16	Беларусь / Belarus	9492	0	0	0	2	2	0,80
17	Австрия / Austria	8773	–	1	–	–	–	–
18	Швейцария / Switzerland	8372	0	0	1	–	0	–
19	Израиль / Israel	8300	–	–	–	0	–	–
20	Болгария / Bulgaria	7365	0	0	0	0	1	0,20
21	Сербия / Serbia	7187	0	1	–	–	–	–
22	Дания / Denmark	5756	0	0	0	0	0	0,00
23	Финляндия / Finland	5474	0	–	0	0	0	–
24	Норвегия / Norway	5109	0	0	–	–	–	–
25	Хорватия / Croatia	4290	–	0	0	0	0	–
26	Литва / Lithuania	2848	0	1	0	0	0	0,20
27	Словения / Slovenia	2064	0	0	0	–	–	–
28	Латвия / Latvia	1950	–	0	0	0	0	–
29	Эстония / Estonia	1314	0	0	0	0	0	0,00
30	Лихтенштейн / Liechtenstein	37	–	–	0	–	–	–
Итого / Total		944 327	130	97	88	90	70	95,00

травмированных имеют отношение к США, где хорошо организована система страхования жизни.

Итак, данные от пожарных бригад позволяют получить следующие ориентировочные оценки. В мире ежегодно при пожарах:

- погибают около 100 тыс. чел.;
- травмируются примерно 350 тыс. чел.;
- погибает пожарных около 250 чел.;
- травмируется пожарных примерно 70–75 тыс. чел.

Все эти данные получены впервые на основе многолетних исследований ЦПС КТИФ [1–15].

Сравним их теперь с данными ВОЗ.

2. Анализ статистических данных ВОЗ

При анализе были использованы официальные данные ВОЗ, содержащиеся в отчете за 2016 г.

(рис. 2–4) [16–20]. Напомним, что ВОЗ учитывает гибель всех людей в мире за год “от огня, тепла и горячих субстанций”. Например, если человек обварился кипятком и от этого погиб, то он входит в статистику ВОЗ, при этом его гибель не связана с пожарами. Следовательно, статистика ВОЗ шире, чем статистика ЦПС КТИФ, и должна учитывать большее число погибших.

В самом деле, из рис. 2 видим, что в Индии по оценке ВОЗ в 2016 г. зафиксировано 45 197 смертей “от огня, тепла и горячих субстанций”, а согласно статистике ЦПС КТИФ при пожарах в Индии погибло примерно 20 тыс. чел. (т. е. в два с лишним раза меньше). Более половины случаев гибели людей от огня в Индии относится к криминальным случаям, связанным с саможжением и сожжением. Это необходимо учитывать при сравнительном анализе.

Таблица 4. Динамика травмирования пожарных в странах мира за 2013–2017 гг. [1]**Table 4.** Trends in firefighter injuries in the countries for 2013–2017 [1]

№ п/п No.	Страна Country	Население, тыс. чел. Population, thous. inh.	Число травмированных пожарных, чел., по годам Number of firefighter injuries by years, inh.					Среднее число травмиро- ванных в год, чел. Average number of fire- fighter injuries per year, inh.
			2013	2014	2015	2016	2017	
1	США / USA	327 167	65 880	63 350	68 085	62 085	58 835	63 647
2	Россия / Russia	146 544	320	320	230	42	—	—
3	Япония / Japan	128 130	2354*	384	—	—	—	—
4	Франция / France	66 628	133	—	—	—	—	—
5	Украина / Ukraine	42 673	—	10	34	21	15	20
6	Польша / Poland	38 413	—	—	—	—	204	—
7	Румыния / Romania	20 121	—	—	16	25	1	—
8	Греция / Greece	10 788	41	—	—	—	—	—
9	Бельгия / Belgium	10 700	30	—	—	—	—	—
10	Чехия / Czech	10 610	168	428	242	182	182	240
11	Венгрия / Hungary	9798	—	53	52	72	72	—
12	Иордания / Jordan	9722	—	—	82	76	52	—
13	Беларусь / Belarus	9492	13	11	3	14	6	9
14	Австрия / Austria	8773	—	949	—	—	—	—
15	Швейцария / Switzerland	8372	162	155	133	—	188	—
16	Израиль / Israel	8300	—	—	—	120	—	—
17	Болгария / Bulgaria	7365	31	25	19	22	23	24
18	Сербия / Serbia	7187	30	34	—	—	—	—
19	Финляндия / Finland	5474	82	—	66	81	43	—
20	Хорватия / Croatia	4290	—	8	11	24	101	—
21	Литва / Lithuania	2848	20	22	14	21	23	20
22	Словения / Slovenia	2064	5	17	5	—	—	—
23	Латвия / Latvia	1950	—	43	57	57	49	—
24	Эстония / Estonia	1315	35	38	51	52	57	47
25	Кипр / Cyprus	858	3	—	—	—	—	—
26	Мальта / Malta	421	—	—	0	0	—	—
27	Лихтенштейн / Liechtenstein	37	—	—	0	—	—	—
Итого / Total		890 040	66 953	65 847	69 100	62 894	59 851	64 929

На рис. 2 приведены данные ВОЗ по 71 стране мира с общей численностью населения 6 664 млн. чел., что составляло 92 % всего народонаселения Земли в 2016 г. В этих странах от “огня, тепла и горячих субстанций” погибло 144 098 чел. (95 % всех таких жертв, так как во всех 194 странах в 2016 г. по данным ВОЗ погибло 152 тыс. чел.) [12].

Обращает внимание на себя тот факт, что более 30 стран из 71 находятся в Африке, где от указанных факторов гибнет достаточно много людей: например, в Нигерии — 8950 чел., Эфиопии — 4404 чел. и т. д. Все эти страны не являются членами КТИФ, поэтому ЦПС КТИФ не имеет возможности учитывать их в своей базе данных.

Тем не менее мы теперь имеем оценку всех погибших от огня и тепла в мире в 2016 г. — 152 тыс. чел. Таким образом, оценка ЦПС КТИФ — 100 000 тыс. чел., ежегодно погибающих в мире именно при пожарах, вполне согласуется с данными ВОЗ.

На рис. 3 представлены те страны, в которых по оценке ВОЗ на 100 тыс. чел. приходится не менее 2 жертв. По существу, это риск для человека погибнуть от “огня, тепла и горячих субстанций” в единицу времени $R_{г}^{ВОЗ}$ (жертв/(год · 10⁵ чел.)). И здесь опять лидируют страны Африки: Коте де Вуар — 9,0; Сомали — 8,8; Бурунди — 7,8; Чад — 7,2 и т. д.

Таким образом, видим, что страны Африки с точки зрения гибели людей от воздействия огня и тепла весьма неблагоприятны. Они занимают значительную часть списка стран, приведенных на рис. 3.

Российская Федерация занимает место в середине списка (см. рис. 3) с показателем риска $R_{г}^{ВОЗ} = 4,9$ жертв/(год · 10⁵ чел.).

3. Сравнение данных ЦПС КТИФ и ВОЗ

В 2012 г. авторы провели непосредственное сравнение данных, полученных от пожарных бригад (ЦПС КТИФ), и ВОЗ [5]. Результаты сравнения

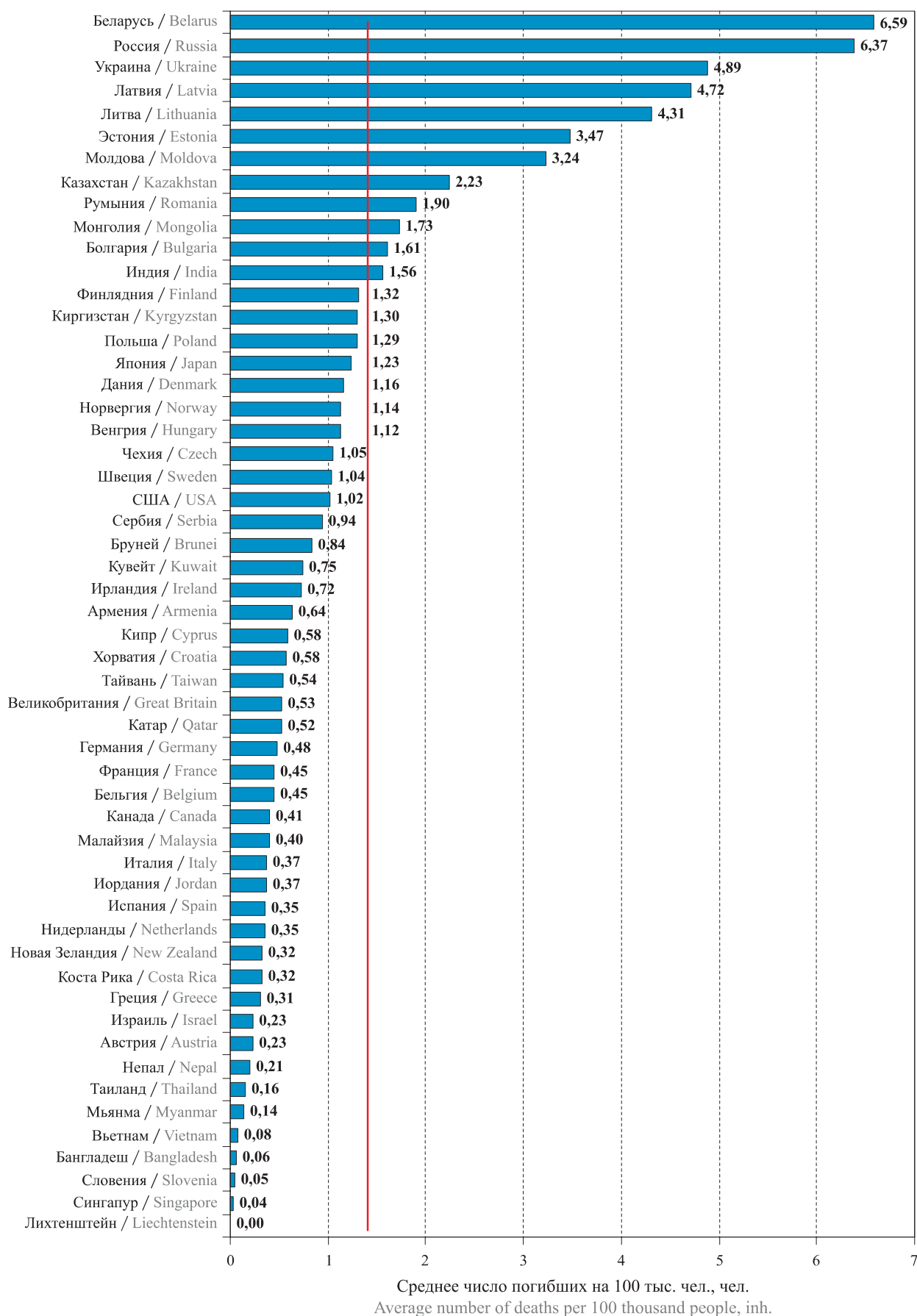


Рис. 1. Среднее число погибших на 100 тыс. чел. (2013–2017 гг.) [1]

Fig. 1. Average number of fire deaths per 100 thous. inh. (2013–2017) [1]

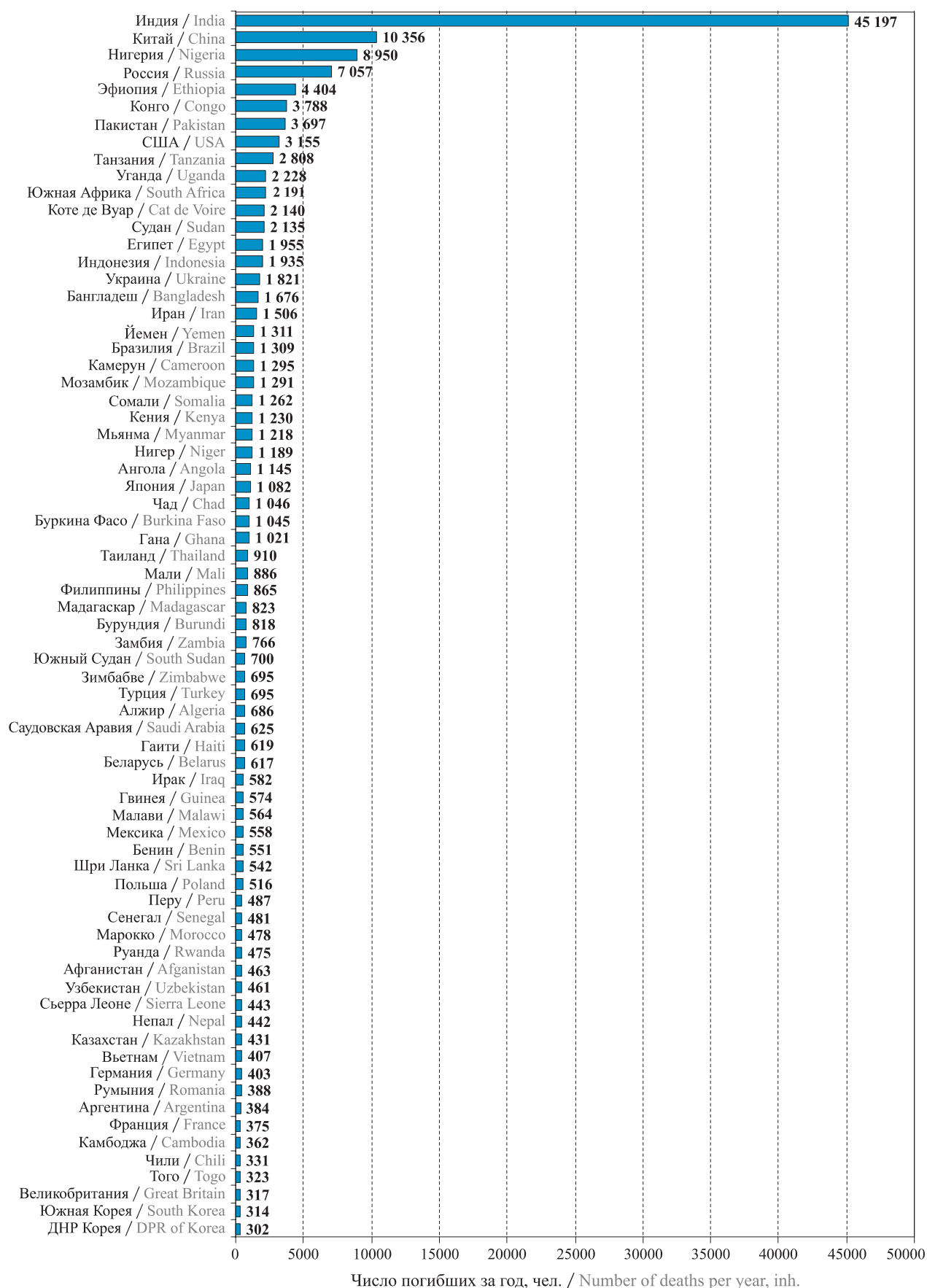


Рис. 2. Распределение числа погибших от огня, тепла и горячих субстанций по данным ВОЗ за 2016 г. [1] для стран, имеющих более 300 погибших в год

Fig. 2. Distribution of estimated deaths from fire, heat and hot substances (WHO, 2016) [1] for countries with more than 300 deaths per year

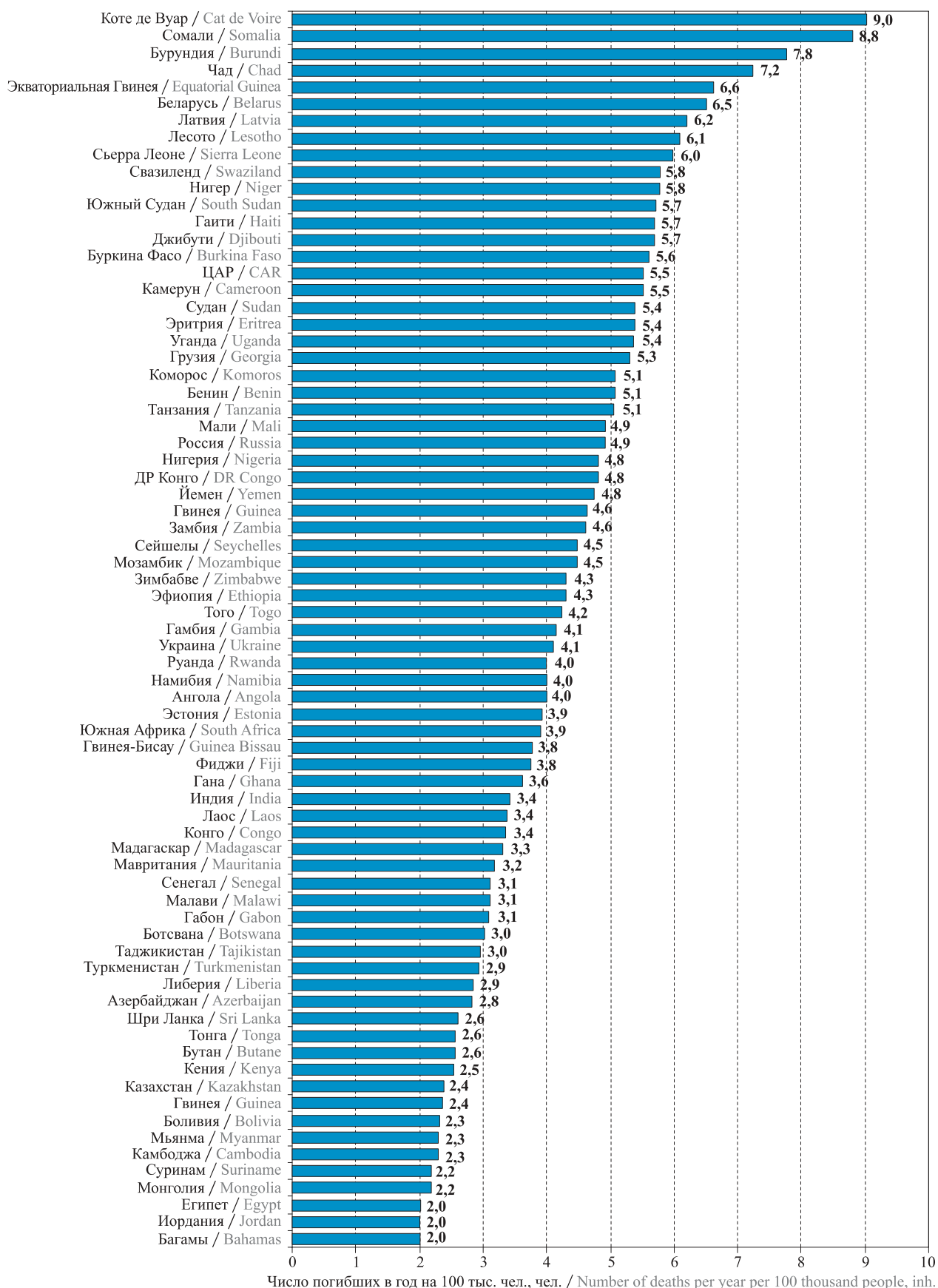


Рис. 3. Распределение числа погибших от огня, тепла и горячих субстанций на 100 тыс. чел. по данным ВОЗ за 2016 г. [1] для стран, имеющих более 2 жертв на 100 тыс. чел.

Fig. 3. Distribution of estimated deaths from fire, heat and hot substances per 100 thous. inh. (WHO, 2016) [1] for countries with more than 2 deaths per 100 thous. inh.

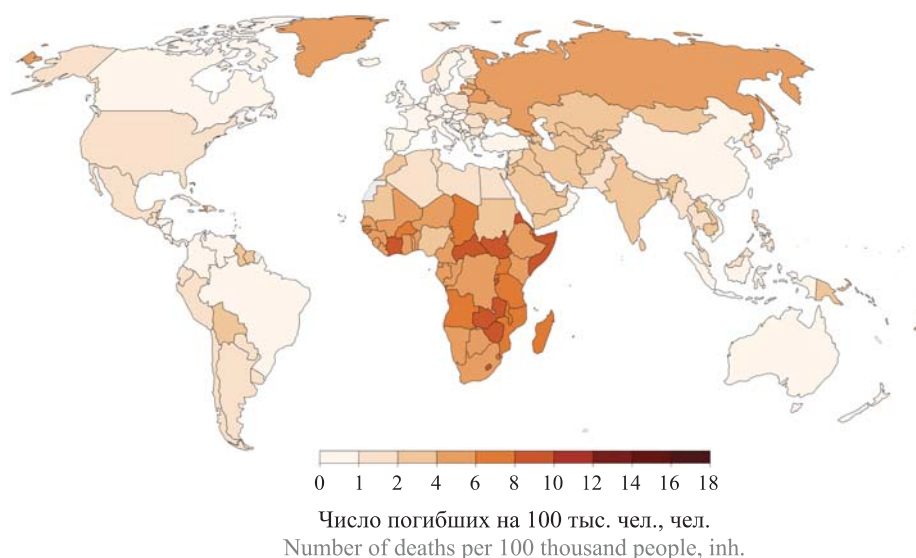


Рис. 4. Распределение числа погибших от огня, тепла и горячих субстанций на 100 тыс. чел. по данным ВОЗ за 2016 г. [17]

Fig. 4. Distribution of estimated deaths from fire, heat and hot substances per 100 thous. inh. (WHO, 2016) [17]

Таблица 5. Распределение погибших от огня в некоторых странах мира по данным ВОЗ и ЦПС в 2012 г. [5]

Table 5. Distribution of fire deaths in the some countries by data WHO and CFS in 2012 [5]

№ п/п No.	Страна Country	Число погибших, чел., по данным Number of fire deaths, inh., by data		Раз- ница, % Diffe- rences, %	№ п/п No.	Страна Country	Число погибших, чел., по данным Number of fire deaths, inh., by data		Раз- ница, % Diffe- rences, %
		ВОЗ WHO	ЦПС CFS				ВОЗ WHO	ЦПС CFS	
1	Индия / India	55292	24520	56	19	Италия / Italy	201	257	-28
2	Россия / Russia	12553	11628	7	20	Греция / Greece	175	49	72
3	Китай / China	9067	1237	86	21	Венгрия / Hungary	140	140	0
4	Пакистан / Pakistan	7724	16527	-114	22	Швеция / Sweden	122	103	16
5	ЮАР / SAR	3832	2776	28	23	Болгария / Bulgaria	119	53	55
6	США / USA	2847	2855	0	24	Латвия / Latvia	116	99	15
7	Украина / Ukraine	2477	2751	-11	25	Монголия / Mongolia	93	75	19
8	Вьетнам / Vietnam	1668	78	95	26	Дания / Denmark	70	65	7
9	Япония / Japan	1332	1721	-29	27	Литва / Lithuania	69	150	-117
10	Аргентина / Argentina	1319	400	70	28	Киргизстан / Kyrgyzstan	67	87	-29
11	Филиппины / Philippines	1002	220	78	29	Финляндия / Finland	65	77	-18
12	Польша / Poland	700	564	19	30	Чехия / Czech	57	125	-118
13	Беларусь / Belarus	660	927	-40	31	Эстония / Estonia	52	54	-3
14	Казахстан / Kazakhstan	599	518	14	32	Хорватия / Croatia	42	36	13
15	Франция / France	488	362	26	33	Австрия / Austria	38	30	22
16	Германия / Germany	422	347	18	34	Норвегия / Norway	35	40	-15
17	Румыния / Romania	393	222	43	35	Кувейт / Kuwait	34	21	39
18	Великобритания / Great Britain	335	380	-13	Итого / Total		104 207	69 494	33

приведены в табл. 5 для 35 стран мира. Из табл. 5 следует, что, как правило, данные ВОЗ несколько превышают соответствующие данные от пожарных бригад, что и следовало ожидать (правда, иногда превышение очень большое, например для Вьетнама, Аргентины, Филиппин, Греции). Однако в 12 странах наблюдается обратная картина: данные от бригад намного превышают данные ВОЗ (например, для Пакистана, Японии, Беларуси, Литвы, Чехии). Эти рас-

хождения объяснить сложнее. Видимо, не все страны дают ВОЗ полную статистику о гибели людей от огня. В целом, как показывает итоговая строка табл. 5, данные ВОЗ на 33 % превышают суммарные данные от пожарных бригад.

В 2019 г. мы провели такую же контрольную проверку данных за 2016 г. для 17 стран (табл. 6). Здесь картина получилась похожей на картину 2012 г. В пяти случаях из 17 данные ВОЗ были меньше, чем

Таблица 6. Распределение погибших от огня в некоторых странах мира по данным ВОЗ и ЦПС в 2016 г.**Table 6.** Distribution of fire deaths in the some countries by data WHO and CFS in 2016

№ п/п No.	Страна Country	Число погибших, чел., по данным Number of fire deaths, inh., by data		Разница, % Differences, %	№ п/п No.	Страна Country	Число погибших, чел., по данным Number of fire deaths, inh., by data		Разница, % Differences, %
		ВОЗ / WHO	ЦПС / CFS				ВОЗ / WHO	ЦПС / CFS	
1	Индия India	45 197	19 797*	56	10	Польша Poland	516	488	5
2	Россия Russia	7057	8749	–24	11	Непал Nepal	442	63*	85
3	США USA	3155	3390	–7	12	Казахстан Kazakhstan	431	371	14
4	Бангладеш Bangladesh	1676	100*	94	13	Вьетнам Vietnam	407	98	76
5	Украина Ukraine	1821	1872	–3	14	Германия Germany	403	393	2
6	Мьянма Myanmar	1218	72*	94	156	Румыния Romania	388	258	34
7	Япония Japan	1082	1452	–34	16	Франция France	375	289	23
8	Таиланд Thailand	910	110*	88	17	Великобритания Great Britain	317	367	–16
9	Беларусь Belarus	617	538	13	Итого Total		66 012	38 407	42

* Средние значения за 2013–2017 гг. / Average data for 2013–2017.

данные ЦПС КТИФ, а в остальных 12 случаях — больше. В целом суммарные данные ВОЗ на 42 % превысили данные ЦПС КТИФ.

Эти результаты также необходимо иметь в виду при анализе итоговых выводов.

Выводы

В целом мы можем подтвердить наши результаты, а именно что в результате пожаров на Земле ежегодно:

- погибают 100–120 тыс. гражданских лиц;
- травмируется примерно 350 тыс. чел.;
- погибают на дежурстве 200–250 пожарных;
- травмируются 70–75 тыс. пожарных.

На основании проведенного анализа и сравнения официальных статистических данных можно утверждать, что впервые получены достаточно надежные оценки гибели и травмирования людей при пожарах в странах мира.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ / REFERENCES

1. N. N. Brushlinsky, M. Ahrens, S. V. Sokolov, P. Wagner. World Fire Statistics. Report No. 24. Berlin, Center of Fire Statistics of CTIF, 2019. 65 p. Available at: https://ctif.org/sites/default/files/2019-04/CTIF_Report24_ERG.pdf (Accessed 20 April 2019).
2. N. N. Brushlinsky, M. Ahrens, S. V. Sokolov, P. Wagner. World Fire Statistics. Report No. 23. Berlin, Center of Fire Statistics of CTIF, 2018. 63 p. Available at: https://ctif.org/sites/default/files/2018-06/CTIF_Report23_World_Fire_Statistics_2018_vs_2_0.pdf (Accessed 20 April 2019).
3. N. N. Brushlinsky, M. Ahrens, S. V. Sokolov, P. Wagner. World Fire Statistics. Report No. 22. Berlin, Center of Fire Statistics of CTIF, 2017. 56 p. Available at: https://ctif.org/sites/default/files/ctif_report22_world_fire_statistics_2017.pdf (Accessed 20 April 2019).
4. Пожары и пожарная безопасность в 2017 году : стат. сб. / Под общ. ред. Д. М. Гордиенко. — М. : ВНИИПО, 2018. — 125 с. / D. M. Gordienko (gen. ed.). *Pozhary i požarnaya bezopasnost v 2017 godu. Statisticheskij sbornik* [Fires and fire safety in 2017. Statistical yearbook]. Moscow, VNIPO Publ., 2018. 125 p. (in Russian).
5. Аренс М., Брушлинский Н. Н., Вагнер П., Соколов С. В. Обстановка с пожарами в мире в начале XXI века // Пожаровзрывобезопасность/Fire and Explosion Safety. — 2015. — Т. 24, № 10. — С. 51–58. DOI: 10.18322/PVB.2015.24.10.51-58. / M. Ahrens, N. N. Bruslinskiy, P. Wagner, S. V. Sokolov. Situation with the fires on the earth at the beginning of the XXI century. *Pozharovzryvobezopasnost/Fire and Explosion Safety*, 2015, vol. 24, no. 10, pp. 51–58 (in Russian). DOI: 10.18322/PVB.2015.24.10.51-58.

6. B. Evarts. *Fire loss in the United States during 2017*. Quincy, MA, National Fire Protection Association, 2018. 50 p.
7. *Les statistiques des services d'incendie et de secours* [Statistics of fire service calls in France]. — Edition 2018 (in French). Available at: <https://www.interieur.gouv.fr/Publications/Statistiques/Securite-civile/2017> (Accessed 25 April 2019).
8. *Annual report. The Singapore Civil Defense Force FY 2018/2019*. Available at: <https://www.scdf.gov.sg/home/about-us/media-room/publications/annual-reports> (Accessed 25 April 2019).
9. *Annuario statistico del corpo nazionale dei vigili del fuoco. Periodo di riferimento: 01.01.2017–31.12.2017 (dati aggiornati al 13.03.2018)* [Annually statistics of fire service in Italy. Reference period: 01.01.2017–31.12.2017 (data updated on 03.13.2018)] (in Italiano). Available at: <http://www.vigilfuoco.it/asp/ReturnDocument.aspx?IdDocumento=13033> (Accessed 25 April 2019).
10. *Fire and rescue statistical release*. Edition 2018. London, Department for Communities and Local Government, 2018.
11. *Fire and Emergency New Zealand Annual Report for the Year Ended 30 June 2018*. Available at: <https://fireandemergency.nz/assets/Documents/Files/FENZ-Annual-Report-2017-2018.pdf> (Accessed 20 April 2019).
12. *Hong Kong Fire Services Department Review 2017*. Available at: https://www.hkfsd.gov.hk/eng/publications/review/review_17.html (Accessed 25 April 2019).
13. *Estudio de vctimas de incendios en Espaca en 2017* (in Spanish). Available at: https://www.fundacion-mapfre.org/fundacion/es_es/images/informe-victimas-incendios-espana-2017_tcm1069-522308.pdf (Accessed 25 April 2019).
14. *The Annual Report 2018 is a review of the Tokyo Fire Department's activities in 2017*. Available at: http://www.tfd.metro.tokyo.jp/hp-soumuka/gyouseigaiyou_e/index.html (Accessed 25 April 2019).
15. London Fire Brigade. *Fires in Greater London 2016*. Available at: <https://www.london-fire.gov.uk/incidents/> (Accessed 25 April 2019).
16. *World health rankings*. Available at: <https://www.worldlifeexpectancy.com/cause-of-death/fires/by-country/> (Accessed 25 April 2019).
17. *Fire deaths rates, 2017*. Available at: <https://ourworldindata.org/grapher/fire-death-rates> (Accessed 25 April 2019).
18. *Global burden of disease study 2016*. Institute for Health Metrics and Evaluation. Available at: http://www.health-data.org/search?search_terms=Global+burden+of+disease+study+2016 (Accessed 20 April 2019).
19. *Global burden of disease study 2017*. Institute for Health Metrics and Evaluation 2018. Available at: http://www.healthdata.org/search?search_terms=19.%09Global+burden+of+disease+study+2017 (Accessed 20 April 2019).
20. *Health statistics and information systems*. World Health Organization. Available at: https://www.who.int/healthinfo/global_burden_disease/estimates/en/ (Accessed 20 April 2019).

Поступила 29.04.2019; после доработки 22.05.2019; принята к публикации 25.05.2019
Received 29 April 2019; received in revised form 22 May 2019; accepted 25 May 2019

Информация об авторах

БРУШЛИНСКИЙ Николай Николаевич, д-р техн. наук, профессор, академик РАЕН, заслуженный деятель науки РФ, профессор Научно-образовательного комплекса организационно-управленческих проблем ГПС, Академия ГПС МЧС России, г. Москва, Российская Федерация; ORCID: 0000-0003-0973-7095; e-mail: albrus-ssv@yandex.ru

СОКОЛОВ Сергей Викторович, д-р техн. наук, профессор, профессор Научно-образовательного комплекса организационно-управленческих проблем ГПС, Академия ГПС МЧС России, г. Москва, Российская Федерация; ORCID: 0000-0002-2992-8510; e-mail: albrus-ssv@yandex.ru

ИВАНОВА Оксана Владимировна, инженер, преподаватель Научно-образовательного комплекса организационно-управленческих проблем ГПС, Академия ГПС МЧС России, г. Москва, Российская Федерация; ORCID: 0000-0001-6049-8195; e-mail: oxivic@mail.ru

Information about the authors

Nikolay N. BRUSLINSKIY, Dr. Sci. (Eng.), Professor, Academician of Russian Academy of Natural Sciences, Honoured Scientist of the Russian Federation, Professor of Scientific and Educational Department, State Fire Academy of Emercom of Russia, Moscow, Russian Federation; ORCID: 0000-0003-0973-7095; e-mail: albrus-ssv@yandex.ru

Sergey V., SOKOLOV, Dr. Sci. (Eng.), Professor, Professor of Scientific and Educational Department, State Fire Academy of Emercom of Russia, Moscow, Russian Federation; ORCID: 0000-0002-2992-8510; e-mail: albrus-ssv@yandex.ru

Oksana V. IVANOVA, Engineer, Lecturer of Scientific and Educational Department, State Fire Academy of Emercom of Russia, Moscow, Russian Federation; ORCID: 0000-0001-6049-8195; e-mail: oxivic@mail.ru

Актуальные проблемы навигации на очаг пожара пожарных роботизированных стволов в роботизированных установках пожаротушения.

Часть 2. Программы управления ПРС при тушении статическими струями с учетом компоновки ПРС относительно очага пожара*

© **Л. М. Мешман**¹, **В. А. Былинкин**¹, **Ю. И. Горбань**^{2✉},
М. Ю. Горбань², **К. Ю. Фокичева**²

¹ Всероссийский научно-исследовательский институт противопожарной обороны МЧС России (Россия, 143903, г. Балашиха Московской обл., мкр. ВНИИПО, 12)

² ООО «Инженерный центр пожарной робототехники «ЭФЭР» (Россия, 185031, Республика Карелия, г. Петрозаводск, ул. Заводская, 4)

РЕЗЮМЕ

Эффективность роботизированных установок пожаротушения в значительной мере зависит от тактики пожаротушения, выбранной для этих программируемых устройств и заключающейся в правильно определенной цели, а это — задача навигации. В этом номере даются заключительные материалы, основанные на огневых испытаниях, проведенных по программе и методике ВНИИПО в 2014–2018 гг. Представлены варианты компоновочных схем ПРС относительно очага пожара. Приведены эпюры орошения статическими навесными или фронтальными струями. Показано, что они зависят от угла атаки струи на защищаемую поверхность. Рассмотрены особенности тушения пожара статическими струями при углах атаки 90° и менее 90°. Приведены параметры пятна соприкосновения струи с поверхностью и орошаемой площади, при которых обеспечивается тушение пожара статическими струями.

Ключевые слова: сканирующие струи; статические струи; угол атаки; эффективная дальность; извещатель наведения; угловые координаты; площадь орошения.

Для цитирования: Мешман Л. М., Былинкин В. А., Горбань Ю. И., Горбань М. Ю., Фокичева К. Ю. Актуальные проблемы навигации на очаг пожара пожарных роботизированных стволов в роботизированных установках пожаротушения. Часть 2. Программы управления ПРС при тушении статическими струями с учетом компоновки ПРС относительно очага пожара // Пожаровзрывобезопасность/Fire and Explosion Safety. — 2019. — Т. 28, № 4. — С. 63–81. DOI: 10.18322/PVB.2019.28.04.63-81.

✉ Горбань Юрий Иванович, e-mail: frgroup@firerobots.ru

1. Компоновка ПРС относительно очага пожара

Некоторые варианты компоновки ПРС относительно очага пожара приведены на рис. 12–15.

То, что каждая точка помещения или защищаемого оборудования должна находиться в зоне действия не менее чем двух ПРС, не означает одновременного воздействия на очаг пожара двух ПРС. Эффективное тушение пожара может быть обеспечено только одним ПРС. Вместе с тем, как свидетельствуют результаты экспериментальных исследований, наиболее эффективное действие РУП наблюдается при одновременной подаче ОТВ из двух противоположно установленных ПРС.

Общий расход огнетушащего вещества и продолжительность непрерывной работы РУП должны

быть не менее указанных в табл. 5.1 СП 5.13130.2009 (далее — СП 5) 5 [40]. Общий расход РУП уточняется с учетом количества ПРС, одновременно задействованных в рабочем режиме, гидравлических потерь в питающем трубопроводе, характера и величины пожарной нагрузки, технологических особенностей объекта, группы помещений 1, 2 или 4 по приложению Б СП 5 [40].

В табл. 5.1 СП 5 [40] указано, что для оросителей общего назначения согласно ГОСТ Р 51043–2002 (Установки водяного и пенного пожаротушения автоматические. Оросители. Общие технические требования. Методы испытаний) минимальная орошаемая площадь с требуемой интенсивностью орошения составляет 12 м², а для традиционных АУП в зависимости от группы помещений по СП 5 [40] — от 60 до 180 м².

Проекция орошаемого пятна навесных, или фронтальных, или строчных компактных струй, или рас-

* Продолжение. Начало см. журнал «Пожаровзрывобезопасность/Fire and Explosion Safety» № 3 за 2019 г.

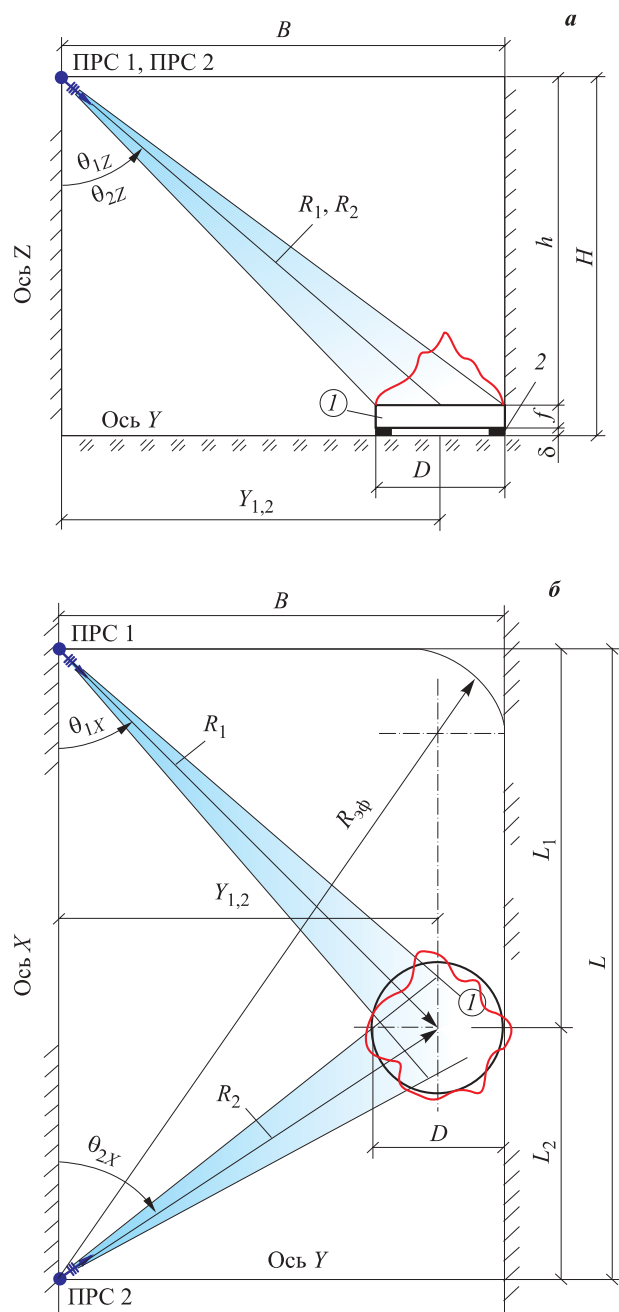


Рис. 12. Компонировка ПРС относительно очага пожара класса В при их одностороннем расположении и подаче статических (стоячих) струй: *а* — вид сбоку; *б* — вид сверху; *1* — пожарная нагрузка (противень с жидким горючим); *2* — подставка; *B* — ширина помещения; *D* — диаметр противня с жидким горючим; *H* — высота монтажа ПРС; *h* — расстояние по перпендикуляру между зеркалом жидкого горючего и осью вращения ствола ПРС; *L* — расстояние между ПРС по оси *X*; *L*₁, *L*₂ — расстояние по перпендикуляру между центром противня с жидким горючим и соответственно ПРС 1 и ПРС 2; *R*₁, *R*₂ — условные осевые компактной струи или распыленного потока ОТВ; *R*_{эф} — эффективная дальность подачи ОТВ; *f* — высота борта противня; θ_{1Z} , θ_{2Z} — угол атаки компактной струи или распыленного потока ОТВ относительно оси *Z* соответственно ПРС 1 или ПРС 2; θ_{1X} , θ_{2X} — угол атаки компактной струи или распыленного потока ОТВ относительно оси *X* соответственно ПРС 1 или ПРС 2; *Y*_{1,2} — расстояние по оси *Y* между центром пожарной нагрузки и соответственно ПРС 1, ПРС 2

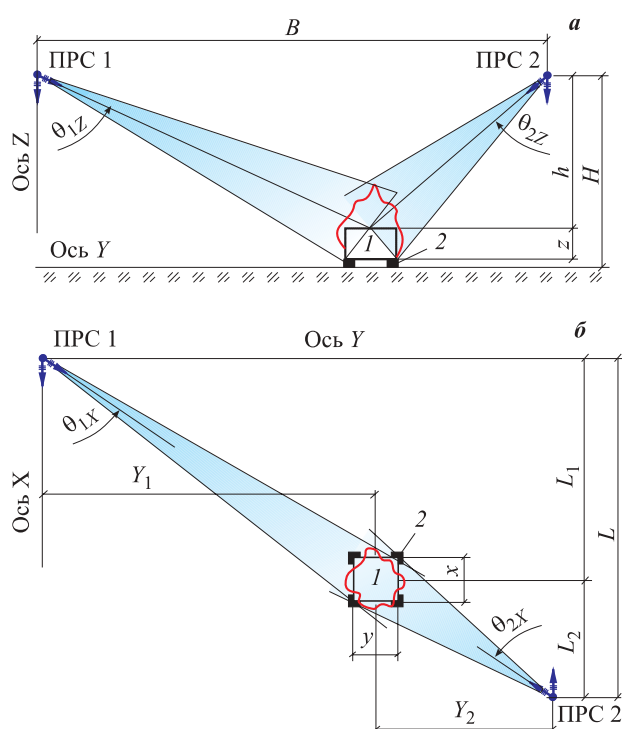


Рис. 13. Компонировка РУП относительно очага пожара класса А при противоположном расположении ПРС и подаче статических (стоячих) струй: *а* — вид сбоку; *б* — вид сверху; *1* — деревянный штабель; *2* — подставка; *H* — высота монтажа ПРС; *h* — расстояние по перпендикуляру между верхней поверхностью пожарной нагрузки и осью вращения ствола ПРС; *L* — расстояние между ПРС по оси *X*; *L*₁, *L*₂ — расстояние по оси *X* между центром пожарной нагрузки и соответственно ПРС 1 и ПРС 2; *x*, *y*, *z* — соответственно длина, ширина и высота пожарной нагрузки; *Y*₁, *Y*₂ — расстояние по оси *Y* между центром пожарной нагрузки и соответственно ПРС 1 и ПРС 2

пыленного потока ОТВ, формируемых одним стволом ПРС, в зависимости от того, под каким углом подается струя на объект защиты, может иметь форму круга или эллипса.

Чтобы струя покрыла минимальную защищаемую круговую площадь 12 м², ее диаметр должен быть не менее 4 м, а диаметр окружности, описанной вокруг квадрата площадью 60 м², — не менее 11 м. Однако чем шире струя, тем меньше ее эффективная дальность, поэтому при таких широких потоках ОТВ их дальность не будет превышать нескольких метров, что абсолютно неприемлемо для конкретных условий применения РУП.

Система управления ПРС должна обеспечивать поддержание гидравлических и кинематических параметров, в том числе угла распыления струи и угла коррекции между линией визирования извещателя наведения и линией возвышения пожарного ствола ПРС, таким образом, чтобы независимо от расстояния до очага пожара диаметр пятна струи ОТВ, контактирующего с объектом защиты, сохранял неизменное значение.

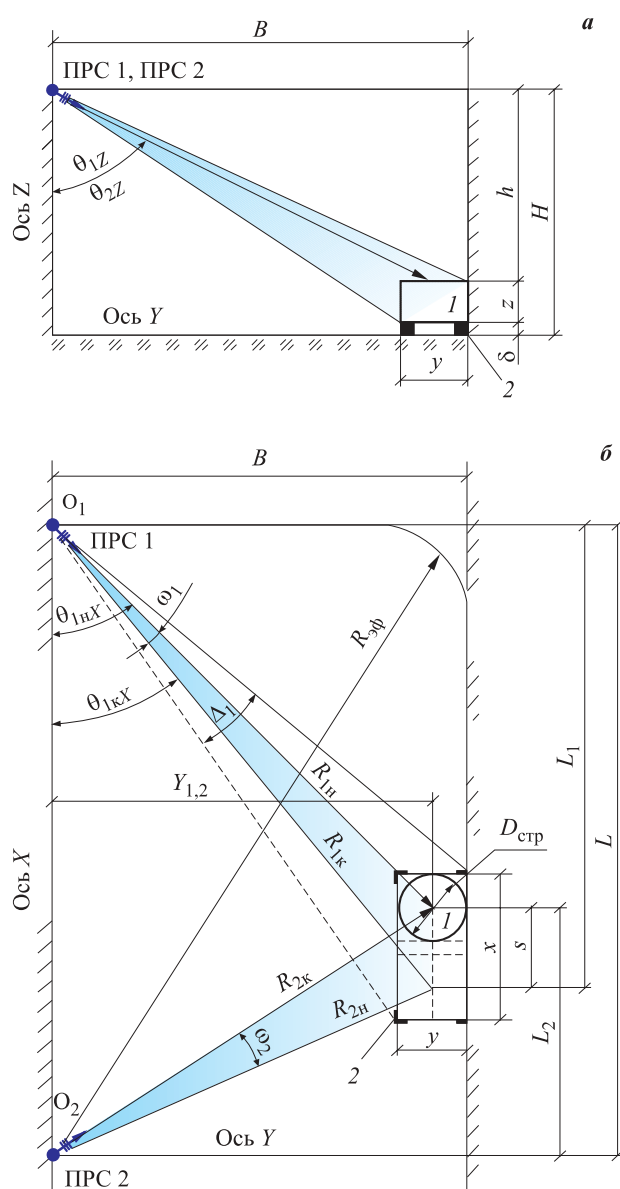


Рис. 14. Компоновка ПРС относительно очага пожара класса А при одностороннем расположении ПРС и подаче сканирующих струй: а — вид сбоку; б — вид сверху; 1 — пожарная нагрузка; 2 — подставка; В — ширина помещения; Н — высота монтажа ПРС; h — расстояние по оси Z между верхней поверхностью пожарной нагрузки и осью вращения ствола ПРС; L — расстояние между ПРС по оси X; L₁, L₂ — расстояние по оси X между верхней поверхностью пожарной нагрузки и соответственно ПРС 1 и ПРС 2; R_{1н}, R_{1к}, R_{2н}, R_{2к} — условные осевые компактной струи или распыленного потока ОТВ соответственно в начале и по окончании цикла сканирования ПРС 1 и ПРС 2; R_{эф} — эффективная дальность подачи ОТВ; x, y, z — соответственно длина, ширина и высота пожарной нагрузки; θ_{1Z} , θ_{2Z} — угол атаки компактной струи или распыленного потока ОТВ относительно оси Z соответственно ПРС 1 или ПРС 2; θ_{1X} , θ_{2X} — угол атаки компактной струи или распыленного потока ОТВ относительно оси X соответственно ПРС 1 или ПРС 2; ω_1 , ω_2 — диапазон углов сканирования соответственно ПРС 1 и ПРС 2; Δ_1 — реальный диапазон углов орошения из ПРС 1; Y_{1,2} — расстояние по оси Y между центром пожарной нагрузки и ПРС 1, ПРС 2

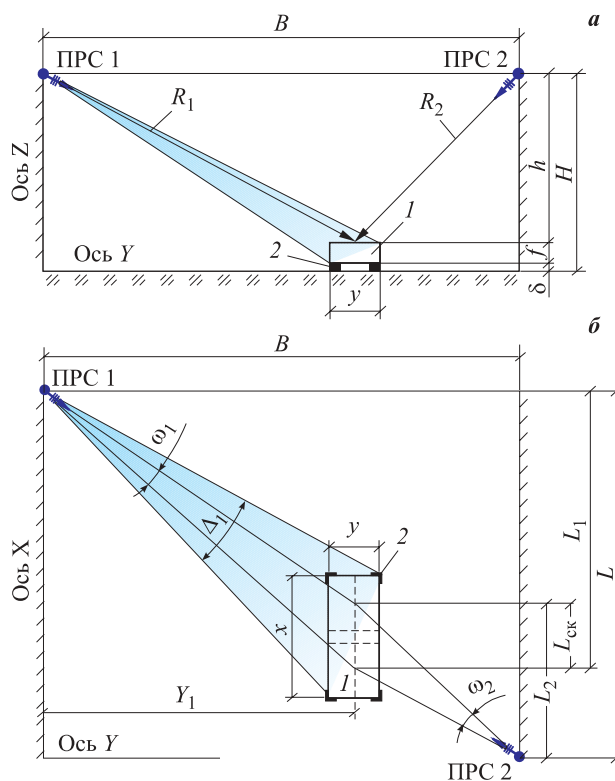


Рис. 15. Компоновка ПРС относительно очага пожара класса В (протяженного прямоугольного противня) при противоположном расположении ПРС и подаче сканирующих струй: а — вид сбоку; б — вид сверху; 1 — пожарная нагрузка (прямоугольный противень с жидким горючим); 2 — подставка; В — ширина помещения; Н — высота монтажа ПРС; h — расстояние по оси Z между зеркалом жидкого горючего и осью вращения ствола ПРС; L — расстояние между ПРС по оси X; L₁, L₂ — расстояние по оси X между центром противня с жидким горючим и соответственно ПРС 1 и ПРС 2; R_{1н}, R_{1к}, R_{2н}, R_{2к} — условные осевые компактной струи или распыленного потока ОТВ соответственно в начале и по окончании цикла сканирования ПРС 1 и ПРС 2; Y₁ — расстояние по оси Y между ПРС 1 и центром пожарной нагрузки; f — высота борта противня; x, y — длина и ширина противня; ω_1 , ω_2 — диапазон углов сканирования соответственно ПРС 1 и ПРС 2; Δ_1 — реальный диапазон углов орошения из ПРС 1

Эпюры орошения навесными или фронтальными струями зависят от угла атаки θ струи на защищаемую поверхность.

В реальных условиях ПРС осуществляет пространственную защиту в горизонтальной плоскости в пределах около 360°. Эпюра орошения защищаемой поверхности струей ствола ПРС при угле атаки $\theta = 90^\circ$ представляет собой круг, а в остальных случаях — эллипс, причем чем меньше угол атаки θ , тем более вытянутую форму будет иметь эллипс.

Количество строк сканирования определяется в зависимости от размера пятна ОТВ, контактирующего с защищаемой поверхностью, и высоты защищаемой зоны.

По результатам проведенных измерений пятна струи орошение как внутри круга, так и внутри эл-

липа имеет неравномерный характер. Достаточно кучный участок с удовлетворительной интенсивностью орошения расположен на расстоянии, составляющем порядка 90 % от максимальной дальности (по крайним каплям). Расстояние до него принято считать эффективной дальностью. Площадь пятна струи, на которую падает до 70 % подаваемой воды, является эффективной зоной орошения. При вибрировании, осциллировании или сканировании струей орошение становится более равномерным. Эффективная зона пятна орошения должна учитываться при составлении программ орошения с учетом дальности струи.

Как следует из приведенных на рис. 8–11* различных компоновочных схем ПРС, визирование извещателя наведения на очаг пожара и возвышение ствола ПРС имеют различную угловую трехмерную ориентацию. Для упрощения и сокращения объема изложения материала взаимодействие струй с поверхностью горючей нагрузки далее условно рассматривается в одной плоскости.

2. Программы управления ПРС при тушении статическими струями

2.1. Статические струи, направленные к фронтальной поверхности ($\theta \approx 90^\circ$)

Для статических струй, направленных к фронтальной поверхности ($\theta \approx 90^\circ$) предельно допустимая площадь пожара оценивается по площади круга S_K , образующегося при контакте струи или распыленного потока ОТВ с объектом защиты.

В данном случае программа ПРС с учетом угла погрешности навигации α и угла зоны нечувствительности извещателя наведения β реализует наведение ствола ПРС одним из двух способов:

- под обрез пламени таким образом, чтобы нижняя кромка пламени находилась целиком в пределах пятна контакта струи с защищаемой поверхностью (рис. 16,а);
- в центр пламени таким образом, чтобы участок объекта защиты, обхваченный пламенем, находился целиком в пределах пятна контакта струи с защищаемой поверхностью (рис. 16,б).

При этом во всех случаях программа управления ПРС обеспечивает попадание струи ОТВ в очаг пожара путем:

- анализа давления ОТВ и в случае его изменения внесения баллистической поправки к вертикальному углу наведения (углу возвышения) выходного патрубка ствола в зависимости от расстояния до очага пожара и давления ОТВ;
- выбора угла распыления ОТВ в зависимости от расстояния от ПРС до очага пожара.

Для рис. 16,а и 16,б диапазон углов орошения с учетом растекания ОТВ по защищаемой поверхности по горизонтали равен реальному диапазону углов орошения $\sigma = \Delta$. Допустим, что в данном случае программа ПРС с учетом угла погрешности навигации α и угла зоны нечувствительности извещателя наведения β реализует наведение ствола ПРС на осевую линию пламени $ВВ_1$ и определяет в зависимости от расстояния до очага пожара необходимый диаметр струи ОТВ $D_{стр}$ в момент ее соприкосновения с поверхностью горения, причем диаметр струи принимается больше длины пламени, т. е. $D_{стр} > L_{пл}$. При наведении ПРС на очаг пожара его ствол может перемещаться не только по горизонтали — слева направо или справа налево, но и одновременно по вертикали — сверху вниз или снизу вверх.

Если визирование струи предполагается по осевой линии регистрируемого очага пожара $ВВ_1$, и он не выходит за пределы площади взаимодействия струи с поверхностью АВС, и угол λ не выходит за пределы угла Δ , то статическая фронтальная струя обеспечивает ликвидацию пожара. В этом случае пятно соприкосновения струи с поверхностью и орошаемая площадь имеют следующие параметры:

- пятно соприкосновения:
 - а) в угловых координатах (здесь и далее: для упрощения изложения угловые координаты приняты только по оси X):

$$\Delta \geq \lambda = \psi + 2\alpha + 2\beta; \quad (1)$$

- б) в линейных размерах (здесь и далее: вследствие $R \gg D_{стр}$ (где R — радиус действия струи) принимаем область дуги L прямой:

$$L_{сопр} = D_{стр} = AC = 2R \operatorname{tg}(\Delta/2) \geq 2R \operatorname{tg}(\psi/2 + \alpha + \beta) \quad (2a)$$

$$\text{или } L_{сопр} \approx \pi \Delta R / 180 \approx \Delta R / 57,3; \quad (2б)$$

- в) площадь

$$S_{сопр} = \pi D_{стр}^2 / 4 = 0,785 D_{стр}^2; \quad (3)$$

- орошаемая площадь:

- а) в угловых координатах:

$$\Delta \geq \lambda = \psi + 2\alpha + 2\beta; \quad (4)$$

- б) в линейных размерах:

$$L_{орош} = D_{стр} = AC = 2R \operatorname{tg}(\Delta/2) \geq 2R \operatorname{tg}(\psi/2 + \alpha + \beta) \quad (5a)$$

$$\text{или } L_{орош} \approx \Delta R / 57,3; \quad (5б)$$

* См. начало настоящей статьи: Мешман Л. М., Былинкин В. А., Горбань Ю. И., Горбань М. Ю., Фокичева К. Ю. Актуальные проблемы навигации на очаг пожара пожарных роботизированных стволов в роботизированных установках пожаротушения. Часть 1. Предпосылки создания РУП и специфические особенности тушения пожаров ПРС // Пожаровзрывобезопасность/Fire and Explosion Safety. — 2019. — Т. 27, № 3. — С. 70–88. DOI: 10.18322/PVB.2019.28.03.70-88.

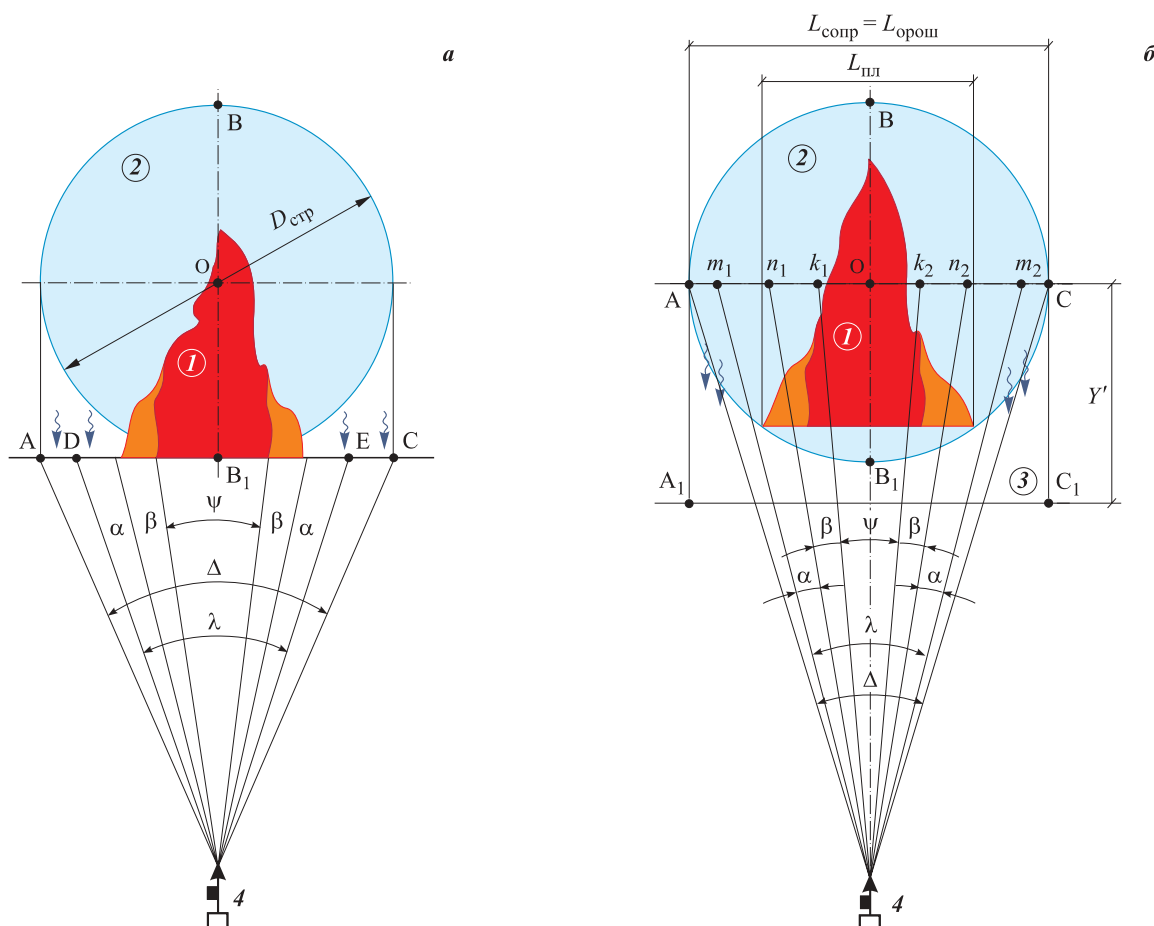


Рис. 16. Эпюра орошения фронтальной поверхности статической струей с углом атаки $\theta \approx 90^\circ$ при ее наведении: *a* — под обреза пламени; *б* — в центр пламени; 1 — пламя; 2 — орошаемая площадь в момент соприкосновения струи с защищаемой поверхностью; 3 — дополнительная площадь, орошаемая за счет стекания ОТВ по вертикали; 4 — ПРС; $D_{\text{стр}}$ — диаметр струи в момент ее соприкосновения с защищаемой поверхностью; $L_{\text{сопр}} = L_{\text{орош}} = AC$ — длина линии соприкосновения и орошения при контакте ОТВ с защищаемой поверхностью; $L_{\text{пл}}$ — длина пламени; Y' — расстояние по оси Y до центра пламени

в) площадь орошения:

$$S_{\text{орош}} = S_{\text{сопр}} \geq \frac{\pi D_{\text{стр}}^2}{8} + Y' D_{\text{стр}}^2 = \left(\frac{\pi}{8} + Y' \right) D_{\text{стр}}^2. \quad (6)$$

Предполагается, что, во-первых, интенсивность орошения в зоне $S_{\text{орош}}$ не ниже, чем в круге $S_{\text{сопр}}$, так как ОТВ после контакта с вертикальной поверхностью стекает вниз по оси Y ; во-вторых, интенсивность и равномерность орошения сохраняются в пределах $Y' \approx (1,0 \div 2,0) D_{\text{стр}}$. При $Y' = 0,5 D_{\text{стр}}$, т. е. при площади орошения, ограниченной высотой $BB_1 = D \sim D_{\text{стр}}$, имеем:

$$\begin{aligned} S_{\text{орош}} = S_{\text{сопр}} &\geq \frac{\pi D_{\text{стр}}^2}{8} + 0,5 D_{\text{стр}}^2 = \\ &= \left(\frac{\pi}{8} + 0,5 \right) D_{\text{стр}}^2 \approx 0,89 D_{\text{стр}}^2. \end{aligned}$$

При этом интенсивность орошения в пределах площади круга диаметром $D_{\text{стр}}$ (см. рис. 16, *a*) должна соответствовать требованиям ГОСТ Р 51043–2002 и СП 5.13130.2009 [40]).

Если очаг пожара выходит за пределы площади пятна взаимодействия струи с поверхностью $S_{\text{авсбв}_1}$,

т. е. угол λ выходит за пределы угла Δ , то условия (4)–(6) не выполняются и пожар статической струей потушен быть не может, вследствие чего для его ликвидации необходимо либо увеличить диаметр струи $D_{\text{стр}}$, либо использовать строчное сканирование.

2.2. Статические струи, направленные под углом к фронтальной поверхности ($0 < \theta < 90^\circ$)

Для статических струй, направленных под углом к фронтальной поверхности ($0 < \theta < 90^\circ$), предельно допустимая площадь пожара изначально оценивается по площади эллипса $S_{\text{э}}$, образующегося при контакте струи или распыленного потока ОТВ с объектом защиты.

Как и в предыдущем случае, программа ПРС с учетом угла погрешности навигации α и угла зоны нечувствительности извещателя наведения β реализует наведение ствола ПРС одним из двух способов:

- под обреза пламени таким образом, чтобы нижняя кромка пламени находилась целиком в пределах пятна контакта струи с защищаемой поверхностью (рис. 17, *a*);

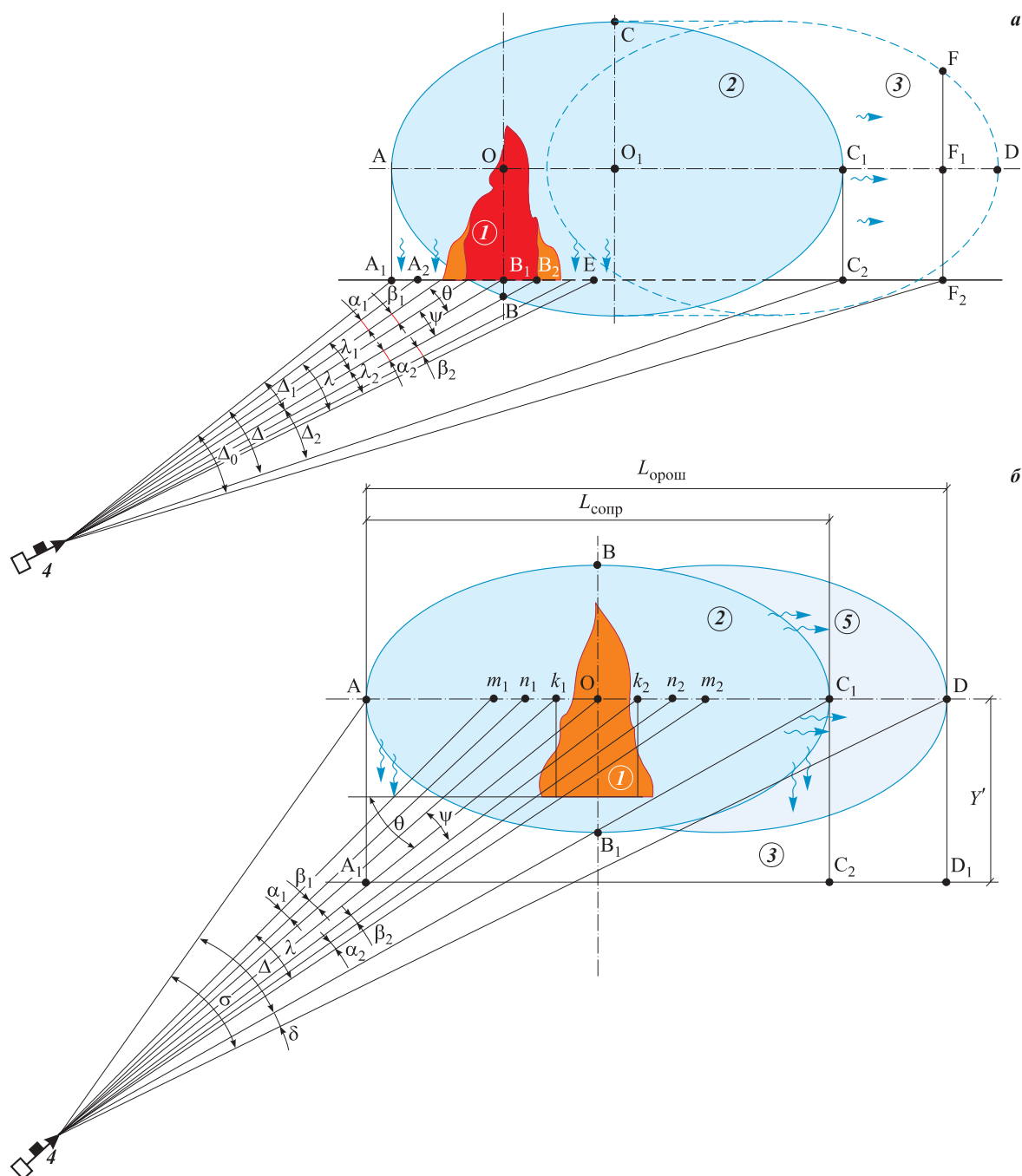


Рис. 17. Эпюра орошения плоской поверхности статической скользящей струей с углом атаки ($0 < \theta < 90^\circ$) при ее наведении: *a* — под обрез пламени; *б* — в центр пламени; 1 — пламя; 2 — орошаемая площадь в момент соприкосновения ОТВ с защищаемой поверхностью; 3 — дополнительная площадь ΔS_r , орошаемая за счет растекания ОТВ по горизонтали; 4 — ПРС; 5 — дополнительная площадь $\Delta S_{\text{в-г}}$, орошаемая за счет стекания ОТВ по вертикали и по горизонтали; $L_{\text{орош}} = AD$ — длина орошения с учетом растекания ОТВ по горизонтали

- в центр пламени таким образом, чтобы участок объекта защиты, обхваченный пламенем, находился в зоне орошения по осевой линии эллипса соприкосновения ОТВ (совмещение вертикальной оси пламени с малой осью эллипса соприкосновения) (рис. 17,б).

В момент соприкосновения компактной струи или распыленного потока ОТВ диаметром $D_{\text{стр}}$ с по-

верхностью горения образуется зона соприкосновения в форме эллипса $S_{\text{сопр}}(ABCB_1A)$, обеспечивающая перекрытие зоны очага горения. Чем меньше угол атаки θ , тем больше площадь эллипса $S_{\text{сопр}}(ABCB_1A)$ и при неизменном расходе меньше интенсивность орошения. Поскольку струя (поток) ОТВ по инерции будет скользить по поверхности орошения по направлению его подачи (по оси X), интенсивность

орошения, приходящаяся на среднюю часть эллипса, будет сохраняться на некотором участке, ограниченном полуэллипсом BDB_1 .

Предполагается, что по сравнению с интенсивностью орошения в зоне непосредственного контакта струи с поверхностью интенсивность орошения в зоне, расположенной вдоль направления потока ОТВ на некотором расстоянии от границы контакта струи с орошаемой поверхностью, при изменении угла атаки θ от 0 до 90° изменяется от максимума до минимума, и наоборот, в некоторой зоне, расположенной ниже строки орошения, — от минимума до максимума (т. е. практически до интенсивности орошения, соответствующей интенсивности в зоне контакта струи с поверхностью).

При определенном значении угла атаки θ длина зоны дополнительного орошения CD может перекрывать погрешность навигации α_2 и зону нечувствительности β_2 извещателя наведения. В этом случае диаметр струи $D_{стр}$ может приниматься даже несколько меньше ширины пламени, поэтому при малом угле атаки можно учитывать только угол погрешности навигации α_1 и угол зоны нечувствительности β_1 извещателя наведения.

В то же время при значительном угле атаки θ площадь пятна соприкосновения струи с поверхностью $ABCB_1A$ меньше, сокращается и дополнительная площадь орошения $ABDB_1A$ и одновременно больше ОТВ стекает вниз по вертикальной плоскости. Следовательно, при большом угле атаки приходится учитывать погрешность угла навигации и угол зоны нечувствительности извещателя наведения с обеих сторон пламени, т. е. и $(\alpha_1 + \beta_1)$, и $(\alpha_2 + \beta_2)$.

Если визирование струи предполагается по осевой линии регистрируемого пламени, а очаг пожара не выходит за пределы площади взаимодействия струи с поверхностью $S_{сопр} = ABCB_1A$ и угол λ не выходит за пределы угла Δ , то статическая струя, действующая под углом атаки θ к фронтальной поверхности, обеспечивает ликвидацию пожара. В этом случае (при $R \gg D_{стр}$) и, допустим, при малом угле атаки пятно соприкосновения струи с поверхностью с квазипостоянной интенсивностью орошения и орошаемая площадь имеют параметры:

- пятно соприкосновения:

- а) в угловых координатах при $\theta < 45^\circ$:

$$\Delta \geq \lambda = (\psi + \alpha_1 + \beta_1); \quad (7a)$$

- при $\theta \geq 45^\circ$:

$$\Delta \geq \lambda = (\psi + \alpha_1 + \beta_1 + \alpha_2 + \beta_2); \quad (7b)$$

- б) в линейных размерах:

$$L_{сопр} = AC = D_{стр}/\sin \theta; \quad (8)$$

- в) площадь орошения:

$$S_{сопр} = \pi \cdot AC \cdot BB_1 / 4 = \pi D_{стр}^2 / (4 \sin \theta); \quad (9)$$

- орошаемая площадь:

- а) в угловых координатах:

$$\sigma = \Delta + \delta; \quad (10)$$

- б) в линейных размерах:

$$L_{орш} = AD = (AC + CD) D_{стр} / \sin \theta; \quad (11a)$$

- при $\theta < 45^\circ$:

$$L_{орш} \approx \frac{(\Delta + \delta)R}{57,3} \geq \frac{(\delta + \psi + \alpha_1 + \beta_1)R}{57,3}; \quad (11b)$$

- при $\theta \geq 45^\circ$:

$$L_{орш} \approx \frac{(\Delta + \delta)R}{57,3} \geq \frac{(\delta + \psi + \alpha_1 + \beta_1 + \alpha_2 + \beta_2)R}{57,3}; \quad (11b)$$

- в) площадь орошения:

$$S_{орш} \approx S_{сопр} + \Delta S_r + \Delta S_b = 0,5 (S_{сопр} + \Delta S_{rBDD_1}) + \Delta S_{bADD_1A_1}. \quad (12)$$

Если очаг пожара выходит за пределы площади $ABDB_1A$ или угол λ — за пределы угла σ , т. е. не выполняются условия (10)–(12), то пожар статической струей не может быть потушен. В этом случае для его ликвидации необходимо либо увеличить диаметр струи $D_{стр}$ (а для поддержания интенсивности орошения повысить и расход), либо использовать строчное сканирование (опять-таки одновременно увеличив расход).

Аналогичные положения приемлемы и для статической навесной струи.

Если защищаемая площадь подвергается орошению статической навесной или фронтальной струей (без сканирования стволом ПРС), то расчет расхода ПРС, необходимого для тушения пожара, упрощается: интенсивность орошения и расход принимаются согласно ГОСТ Р 51043–2002 и СП 5 [40]. В то же время программа управления должна обеспечивать (независимо от расстояния от ПРС до защищаемой поверхности) за счет регулировки угла раскрытия струи квазипостоянную площадь пятна контакта ОТВ с защищаемой поверхностью.

Расход ПРС Q (л/м²) для статической фронтальной, действующей под углом к фронтальной поверхности, или навесной струи рассчитывается из условия:

$$Q = Ki S_{сопр} / \sin \theta = Ki S_{орш}, \quad (13)$$

где K — коэффициент использования расхода;

$$K = 1,2 \div 1,3;$$

i — нормативная интенсивность орошения по СП 5 [40], л/(с·м²).

Площадь пятна соприкосновения струи с поверхностью в форме круга при $\theta = 90^\circ$ определяется как

$S_{\text{сопр.к}} = \pi D_{\text{стр}}^2 / 4$, в форме эллипса при $\theta \neq 90^\circ$ — как $S_{\text{сопр.э}} = \pi D_{\text{стр}}^2 / (4 \sin \theta)$.

Во сколько раз увеличивается $S_{\text{орош}}$ по сравнению с $S_{\text{сопр}}$, во столько раз потребуется увеличить расход ОТВ. Необходимо учитывать этот фактор при проектировании РУП и при определении расстояния между ПРС, входящих в состав РУП, стараться, чтобы угол атаки θ каждого ПРС был как можно больше.

Выводы

Статические струи в практике РУП применяются нечасто. Однако введенные понятия и представленные расчеты имеют существенное значение для сканирующих струй, широко применяемых в РУП непосредственно для пожаротушения, и о них пойдет речь в следующей заключительной главе.

Окончание следует

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Shanee Honig, Tal Oron-Gilad*. Understanding and resolving failures in human-robot interaction: Literature review and model development // *Frontiers in Psychology*. — 2018. — Vol. 9. — Article No. 861. — 21 p. DOI: 10.3389/fpsyg.2018.00861.
2. Аналитическое исследование: мировой рынок робототехники. — М. : Национальная Ассоциация участников рынка робототехники, 2016. — 157 с. URL: http://robotforum.ru/assets/files/000_News/NAURR-Analiticheskoe-issledovanie-mirovogo-rinka-robototekhniki-%28yanvar-2016%29.pdf (дата обращения: 05.01.2019).
3. *Marchant G. E., Allenby B., Arkin R. C., Borenstein J., Gaudet L. M., Kittrie O., Lin P., Lucas G. R., O'Meara R., Silberman J.* International governance of autonomous military robots // *Handbook of unmanned aerial vehicles* / Valavanis K. P., Vachtsevanos G. J. (eds). — Dordrecht : Springer, 2015. — P. 2879–2910. DOI: 10.1007/978-90-481-9707-1_102.
4. *Møller Michael*. UN meeting targets 'killer robots' // *UN News*. — 14 May 2014. URL: <http://www.un.org/apps/news/story.asp?NewsID=47794> (дата обращения: 07.01.2019).
5. *Cummings M. L.* Unmanned robotics and new warfare: a pilot/professor's perspective // *Harvard National Security Journal*. — 24 March 2010. URL: <http://harvardnsj.org/2010/03/unmanned-robotics-new-warfare-a-pilotprofessors-perspective/> (дата обращения: 07.01.2019).
6. 11 police robots patrolling around the world // *Wired*. — 24 July 2016. URL: <https://www.wired.com/2016/07/11-police-robots-patrolling-around-world/> (дата обращения: 05.01.2019).
7. *Бойко Алексей (ABloud)*. Каталог пожарных роботов. Пожарные роботы. Роботизированная техника для борьбы с пожарами. URL: <http://robotrends.ru/robopedia/katalog-pozharnyh-robotov> (дата обращения: 05.01.2019).
8. *Tan Chee Fai, Liew S. M., Alkahari M. R., Ranjit S. S. S., Said M. R., Chen W., Rauterberg G. W. M., Sivakumar D., Sivarao*. Fire fighting mobile robot: state of the art and recent development // *Australian Journal of Basic and Applied Sciences*. — 2013. — Vol. 7, No. 10. — P. 220–230.
9. Fire robots and fire robots technology: product catalogue 2015–2016. — Petrozavodsk : "FR" Engineering Centre of Fire Robots Technology, LLC. Publ., 2017. — 23 p. URL: <http://www.russchinatrade.ru/assets/files/ru-offer/FR%E4%BA%A7%E5%93%81%E7%9B%AE%E5%BD%952015%E8%8B%B1%E6%96%87%E7%89%88.pdf> (дата обращения: 20.12.2018).
10. Роботы в промышленности — их типы и разновидности. Робототехника, 3D-принтеры. Блог компании Top 3D Shop. URL: <https://habr.com/ru/company/top3dshop/blog/403323/> (дата обращения: 25.12.2018).
11. *Melanson Tony*. What Industry 4.0 means for manufacturers. URL: <https://aethon.com/mobile-robots-and-industry4-0/> (дата обращения: 05.01.2019).
12. Каталог решений роботизированного транспорта. Транспорт и роботы. Зарубежные решения. URL: <http://robotrends.ru/robopedia/katalog-resheniy-robotizirovannogo-transporta> (дата обращения: 10.01.2019).
13. *Ruggiero Alexander, Salvo Sebastian, Laurent Chase St.* Robotics in construction: IQP Final Report 3/24/2016. — Massport, 2016. — 78 p. URL: <http://web.wpi.edu/Pubs/E-project/Available/E-project-032316-150233/unrestricted/FinalReport.pdf> (дата обращения: 10.01.2019).
14. Robots in Agriculture. URL: <http://www.intorobotics.com/35-robots-in-agriculture/> (дата обращения: 05.01.2019).
15. *Juan Jesús Roldán, Jaime del Cerro, David Garzón Ramos, Pablo Garcia Aunon, Mario Garzón, Jorge de León, Antonio Barrientos*. Robots in agriculture: State of art and practical experiences // *Service Robots* / Rolf Dieter Schraft, Gernot Schmierer. — New York : A K Peters / CRC Press, 2018. — 228 p. DOI: 10.5772/intechopen.69874.

16. *Van Oost E., Reed D.* Towards a sociological understanding of robots as companions // HRP 2010: Human-Robot Personal Relationships. Lecture Notes of the Institute for Computer Sciences, Social Informatics and Telecommunications Engineering / Lamers M. H., Verbeek F. J. (eds). — Heidelberg : Springer. — P. 11–18. DOI: 10.1007/978-3-642-19385-9_2.
17. *Van der Plas A., Smits M., Wehrmann C.* Beyond speculative robot ethics: a vision assessment study on the future of the robotic caretaker // Accountability in Research. — 2010. — Vol. 17, Issue 6. — P. 299–315. DOI: 10.1080/08989621.2010.524078.
18. *Van Wynsberghe A.* Designing robots for care: care centered value-sensitive design // Science and Engineering Ethics. — 2013. — Vol. 19, Issue 2. — P. 407–433. DOI: 10.1007/s11948-011-9343-6.
19. *Robinette P., Howard A., Wagner A. R.* Conceptualizing overtrust in robots: why do people trust a robot that previously failed? // Autonomy and artificial intelligence: a threat or savior? / Lawless W. F., Mittu R., Sofge D., Russell S. (eds). — Cham : Springer, 2017. — P. 129–155. DOI: 10.1007/978-3-319-59719-5_6.
20. *Ефанов В., Мартынов М., Пичхадзе К.* Космические роботы для научных исследований // Наука в России. — 2012. — № 1. — С. 4–11.
21. *Royakkers L., van Est R.* A literature review on new robotics: automation from love to war // International Journal of Social Robotics. — 2015. — Vol. 7, Issue 5. — P. 549–570. DOI: 10.1007/s12369-015-0295-x.
22. *Honig S., Oron-Gilad T.* Understanding and resolving failures in human-robot interaction: literature review and model development // Frontiers in Psychology. — 2018. — Vol. 9. DOI: 10.3389/fpsyg.2018.00861.
23. Автоматическая установка с самонаведением средств тушения на очаг пожара // Пожарное дело. — 1970. — № 2. — С. 257.
24. А. с. 257300 СССР. МПК А62С 37/10 (2000.01), А62С 37/40 (2000.01). Устройство для наведения огнетушащей струи на очаг пожара / Веселов А. И., Абдеев М. Г., Балагин П. Г. — № 1206295.29-14; заявл. 26.12.1967; опубл. 11.11.1969, Бюл. № 35.
25. А. с. 370950 СССР. МПК А62С 37/04 (2000.01). Устройство для наведения огнетушащей струи на очаг пожара / Мешман Л. М. — № 1488694/29-14; заявл. 02.11.1970; опубл. 22.11.1973, Бюл. № 12.
26. *Веселов А. И., Мешман Л. М.* Автоматическая пожаро- и взрывозащита предприятий химической и нефтехимической промышленности. — М. : Химия, 1975. — 280 с.
27. *Weselow A. I., Meschman L. M.* Automatischer brand- und explosionschutz. — Berlin : Staatsverlag DDR, 1979. — 200 s.
28. *Попов Н. Л., Горбань Ю. И.* Пожарные роботы // Пожарное дело. — 1986. — № 7. — С. 20–21.
29. *Мешман Л. М., Верецагин С. Н.* Современная пожарная робототехника : обзорная информация. — М. : ГИЦ МВД СССР, 1988. — 42 с.
30. *Мешман Л. М., Пивоваров В. В., Гомозов А. В., Верецагин С. Н.* Пожарная робототехника. Состояние и перспективы использования : обзорная информация. — М. : ВНИИПО МВД СССР, 1992. — 82 с.
31. *Мешман Л. М., Верецагин С. Н., Широков С. М., Алдонясов В. И.* Баллистика сканирующих струй // Пожарная техника и тушение пожаров. — М. : ВНИИПО МВД СССР, 1990. — С. 61–66.
32. НПБ 84–2000. Установки водяного и пенного пожаротушения роботизированные. Общие технические требования. Методы испытаний. URL: <http://docs.cntd.ru/document/1200016071> (дата обращения: 10.01.2019).
33. Технический регламент о требованиях пожарной безопасности : Федер. закон РФ от 22.07.2008 № 123-ФЗ (в ред. от 29.07.2017). URL: <http://docs.cntd.ru/document/902111644> (дата обращения: 25.12.2018).
34. FM 142.1. Approval Standard for Fire Protection Monitor Assemblies. FM Approvals LLC, 2018. — 28 p.
35. *Jensen G.* Fire fighting systems: Comparison of performances of interior and exterior applications at large wood buildings. KA PROJECT. Test report A075349. Final. — Trondheim : COWI AS, 2018. — 26 p. (in Norwegian).
36. *Gorban Yu. I.* An automated fire-fighting complex integrating a television system. European patent 2599525B; publ. date 30.12.2015, Bull. 53.
37. *Gorban Yu. I.* Fire robots // Industrial Fire Journal. — 2016. — No. 103. — P. 12–13.
38. Пат. 2677622 Российская Федерация. МПК А62С 35/00 (2006.01). Роботизированный пожарный комплекс на базе пожарных мини-роботов-оросителей с системой удаленного доступа / Горбань Ю. И. — № 2018116814; заявл. 04.05.2018; опубл. 17.01.2019, Бюл. № 2.
39. *Горбань Ю. И.* Пожарные роботы и ствольная техника в пожарной автоматике и пожарной охране. — М. : Пожнаука, 2013. — 352 с.

40. СП 5.13130.2009. Системы противопожарной защиты. Установки пожарной сигнализации и пожаротушения автоматические. Нормы и правила проектирования (ред. от 01.06.2011). URL: <http://base.garant.ru/195658/> (дата обращения: 15.12.2018).
41. ВНИПБ 39–16 (СТО 1682.0017–2015). Роботизированная установка пожаротушения. Нормы и правила проектирования. — М. : ВНИИПО МЧС России, 2016. — 84 с.

Поступила 12.01.2019; после доработки 20.02.2019; принята к публикации 22.02.2019

Информация об авторах

МЕШМАН Леонид Мунеевич, канд. техн. наук, старший научный сотрудник, ведущий научный сотрудник, Всероссийский научно-исследовательский институт противопожарной обороны МЧС России, г. Балашиха Московской обл., Российская Федерация

БЫЛИНКИН Владимир Александрович, канд. техн. наук, начальник сектора, Всероссийский научно-исследовательский институт противопожарной обороны МЧС России, г. Балашиха Московской обл., Российская Федерация; ORCID: 0000-0002-4034-2510; Scopus Author ID: 6506544327; e-mail: fire404@mail.ru

ГОРБАНЬ Юрий Иванович, генеральный директор, ООО “Инженерный центр пожарной робототехники “ЭФЭР”, Республика Карелия, г. Петрозаводск, Российская Федерация; ORCID: 0000-0002-4452-6798; e-mail: frgroup@firerobots.ru

ГОРБАНЬ Михаил Юрьевич, технический директор – ГИП, ООО “Инженерный центр пожарной робототехники “ЭФЭР”, Республика Карелия, г. Петрозаводск, Российская Федерация; ORCID: 0000-0001-9191-426X; e-mail: kristinaz@firerobots.ru

ФОКИЧЕВА Кристина Юрьевна, ведущий инженер-проектировщик, ООО “Инженерный центр пожарной робототехники “ЭФЭР”, Республика Карелия, г. Петрозаводск, Российская Федерация; ORCID: 0000-0003-2850-7324; e-mail: kristinaz@firerobots.ru



Издательство «ПОЖНАУКА»



Г. И. Смелков, В. Н. Черкасов,
В. Н. Веревкин, В. А. Пехотиков, А. И. Рябиков

ЭЛЕКТРОУСТАНОВКИ во взрывопожароопасных зонах

Справочное пособие

Приводятся новые, отвечающие современной нормативной базе, требования по классификации горючих смесей и пожаровзрывоопасных зон; рекомендации по выбору и использованию оборудования, включая кабельные изделия во взрывопожароопасных зонах.

Издание предназначено для инженерно-технических работников, занимающихся проектированием и монтажом электроустановок, работников пожарной охраны и специалистов широкого профиля в качестве учебного пособия для подготовки и повышения квалификации в области пожаровзрывобезопасности электроустановок.

121352, г. Москва, а/я 6; тел./факс: (495) 228-09-03; e-mail: info@fire-smi.ru

Actual problems of positioning of the robotic monitors to fire area in robotic fire suppression systems.

Part 2. RFM operating programs for fire extinguishing with static streams considering RFMs positioning to fire area*

© **Leonid M. Meshman**¹, **Vladimir A. Bylinkin**¹, **Yuriy I. Gorban**^{2✉},
Mikhail Yu. Gorban², **Kristina Yu. Fokicheva**²

¹ All-Russian Research Institute for Fire Protection of Emercom of Russia (VNIPO, 12, Balashikha, Moscow Region, 143903, Russian Federation)

² Engineering Centre of Fire Robots Technology "FR" LLC (Zavodskaya St., 4, Petrozavodsk, Republic of Karelia, 185031, Russian Federation)

ABSTRACT

The efficiency of robotic fire monitors depends on the fire extinguishing method chosen for these programmable devices to the large extent. This efficiency depends on the correct target, it means on the correct positioning. This issue contains final materials based on fire tests conducted according to the program and methods of VNIPO in 2014–2018 years. Options for RFM positioning with respect to fire area are described. Curves of coverage by static high-angled or frontal streams are given. It is shown that curves depend on the angle of stream attack to the protected surface. The features of fire extinguishing with static streams at angles of attack of 90° and less than 90° are given. The parameters at which fire is to be extinguished by static stream are given for stream contact spot with surface and covered area.

Keywords: scanning streams; static streams; angle of attack; effective range; targeting detectors; angular coordinates; coverage area.

For citation: L. M. Meshman, V. A. Bylinkin, Yu. I. Gorban, M. Yu. Gorban, K. Yu. Fokicheva. Actual problems of positioning of the robotic monitors to fire area in robotic fire suppression systems. Part 2. RFM operating programs for fire extinguishing with static streams considering RFMs positioning to fire area. *Pozharovzryvobezopasnost/Fire and Explosion Safety*, 2019, vol. 28, no. 4, pp. 63–81. DOI: 10.18322/PVB.2019.28.04.63-81.

✉ Yuriy Ivanovich Gorban, e-mail: frgroup@firerobots.ru

1. RFMs positioning with respect to fire area

Options of RFM positioning with respect to fire area are shown in Fig. 12–15.

If each place of room or point of equipment to be protected must be located in operation area of at least two RFMs it does not mean that two RFMs should simultaneously operate and extinguish the fire area. Efficient fire extinguishing can be provided by only one RFM. At the same time, according to the results of experiments, the most efficient operation of RFSS is observed when FEA is supplied simultaneously from two oppositely installed RFMs.

The total flow rate of fire extinguishing agent and the duration of RFSS continuous operation shall be at least as those specified in Table 5.1 of Set of rules 5.13130.2009 (SP 5) [40]. The total flow rate of RFSS is to be specified taking into account the number of RFMs simultaneously operated, the hydraulic losses in supply pipeline, type and size of fire load, technolo-

gical features of the object, type of rooms (1, 2 or 4) according to Appendix B of SP 5 [40].

It is indicated in Table 5.1 of SP 5 [40] that for general-purpose sprinklers, according to GOST R 51043–2002 (Automatic water and foam fire fighting systems. Sprinklers, spray nozzles and water mist nozzles. General technical requirements. Test methods), the minimum coverage area with the required coverage intensity is 12 m², and for conventional AFSS (depending on room class according to Construction Rules SP 5 [40]) — from 60 to 180 m².

The projection of covered spot of high-angled streams, or frontal streams, or scanning straight streams, or sprayed FEA streams generated by one RFM, depending on angle of stream supplying to object to be protected, may be in the form of a circle or an ellipse.

For the stream to cover minimum protected circular area of 12 m², its diameter shall be at least 4 m, and the diameter of the circle circumscribed about a four-square of 60 m² — at least 11 m. However, the wider is the stream, the smaller is its effective maximum range, therefore in case of FEA wide streams their range will

* It is continuation. See the beginning of this article in *Pozharovzryvobezopasnost/Fire and Explosion Safety*, 2019, no. 3.

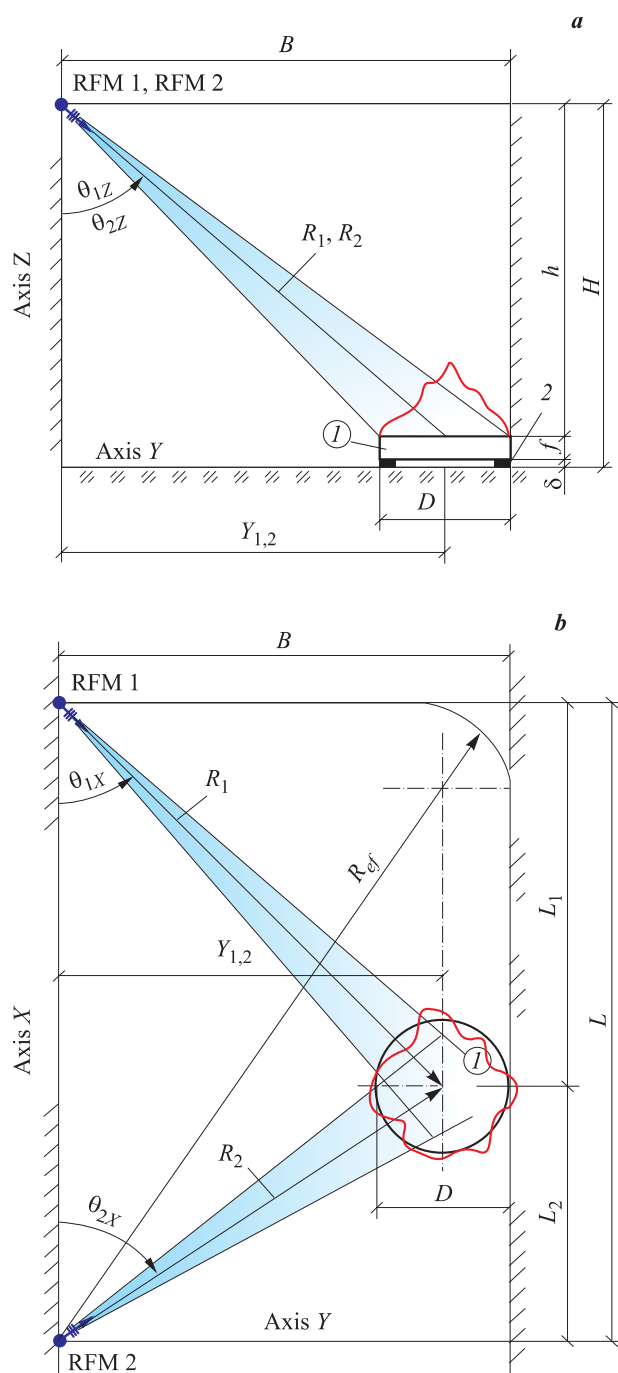


Fig. 12. RFMs positioning with respect to class B fire area if they are located at one side and in case of use of static (stationary) streams: *a* — side view; *b* — top view; *l* — fire load (tray with liquid fuel); *2* — support; *B* — room width; *D* — diameter of the tray with liquid fuel; *H* — height of RFM installation; *h* — perpendicular distance between liquid fuel surface and RFM rotation axis; *L* — distance between RFMs along axis *X*; *L*₁, *L*₂ — perpendicular distance between the center of the tray with liquid fuel and RFM 1 and RFM 2 respectively; *R*₁, *R*₂ — conventional axes of straight stream or FEA sprayed stream; *R*_{ef} — efficient range of FEA stream; *f* — height of tray sides; θ_{1Z} , θ_{2Z} — angle of attack of straight stream or FEA sprayed stream along the axis *Z* of RFM 1 and RFM 2 respectively; θ_{1X} , θ_{2X} — angle of attack of straight stream or FEA sprayed stream along the axis *X* of RFM 1 or RFM 2 respectively; *Y*_{1,2} — *Y* axial distance between center of fire load and RFM 1, RFM 2

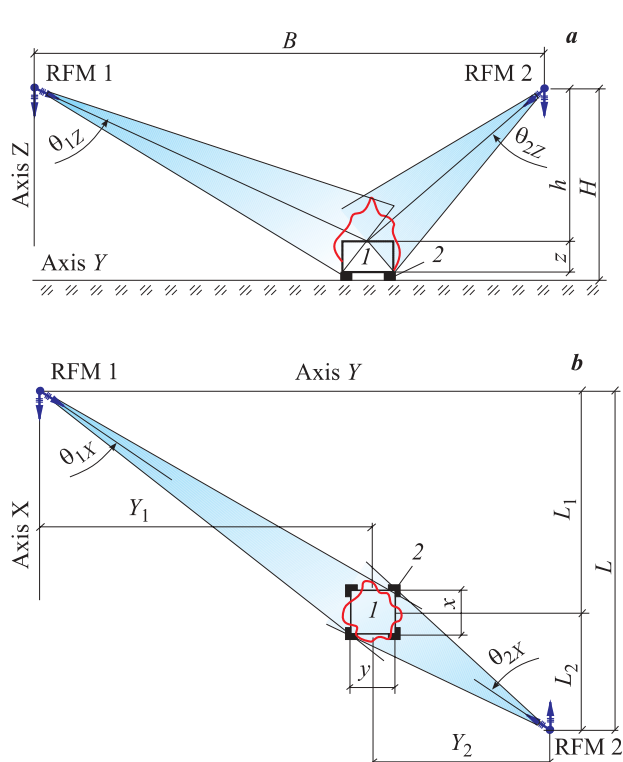


Fig. 13. RFMs positioning with respect to class A fire area if RFMs are located opposite to static (stationary) stream supply: *a* — side view; *b* — top view; *l* — wooden stack-pile; *2* — support; *H* — height of RFM installation; *h* — perpendicular distance between top surface of fire load and RFM rotation axis; *L* — distance between RFMs along axis *X*; *L*₁, *L*₂ — perpendicular distance between the center of fire load and RFM 1 and RFM 2 respectively; *x*, *y*, *z* — length, width and height of fire load; *Y*₁, *Y*₂ — distance along the axis *Y* between center of fire load and RFM 1 and RFM 2 respectively

not exceed several meters, which is absolutely unacceptable for the specific conditions of RFSS use.

The RFM control system shall provide hydraulic and traveltime parameters, including the stream spray angle and correction angle between the vision line of targeting detector and the elevation line of RFM, so that notwithstanding of the distance to fire area the diameter of FEA stream spot that contacts with the object to be protected shall be kept unchanged.

Coverage curves for high-angled or frontal streams depend on stream angle of attack θ to the protected surface.

In actual practice, RFM provides space protection in the horizontal plane within about 360° . Curve of coverage of the protected surface by RFM stream at the angle of attack $\theta = 90^\circ$ is a circle, and in other cases — an ellipse, and the smaller is the angle of attack θ , the more elongated will be the ellipse.

The number of scanning lines is determined depending on the size of FEA spot that contacts with the surface to be protected and the height of area to be protected.

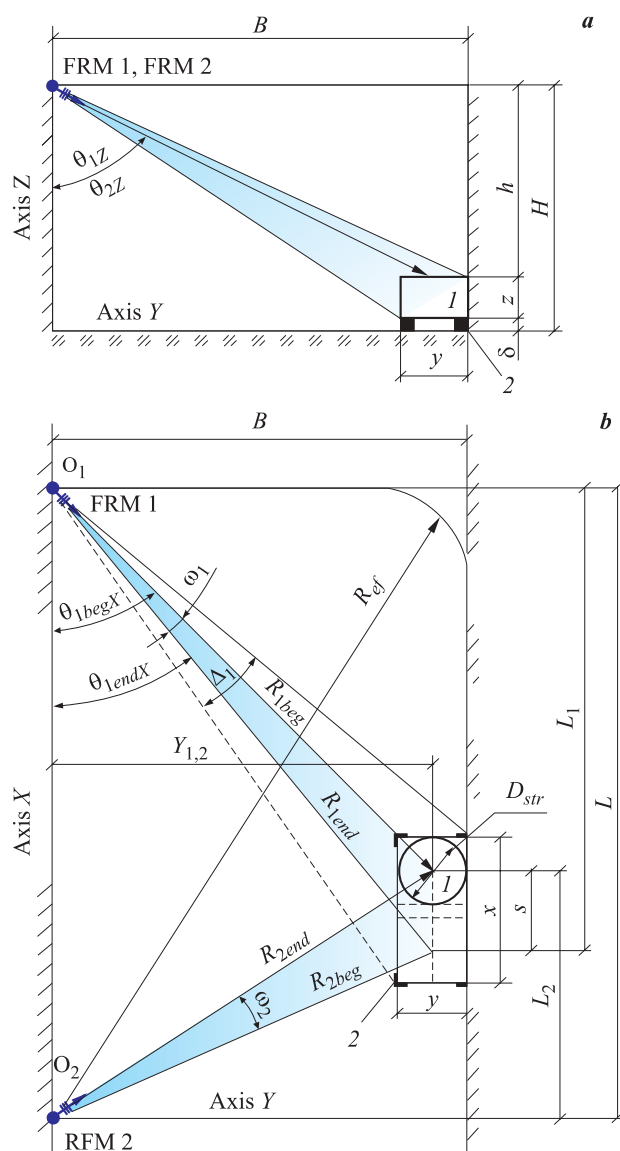


Fig. 14. RFMs positioning with respect to class A fire area if they are located at one side and in case of scanning streams: *a* — side view; *b* — top view; 1 — fire load; 2 — support; *B* — room width; *H* — height of RFM installation; *h* — distance between top surface of fire load along axis *Z* and RFM rotation axis; *L* — distance between RFMs along axis *X*; *L*₁, *L*₂ — distance between the center of top surface of fire load along *X* axis and RFM 1 and RFM 2 respectively; *R*_{1beg}, *R*_{1end}, *R*_{2beg}, *R*_{2end} — conventional axes of straight stream or FEA sprayed stream at the beginning and end of scanning cycle of RFM 1 and RFM 2 respectively; *R*_{ef} — efficient range of FEA stream; *x*, *y*, *z* — length, width and height of fire load; θ_{1Z} , θ_{2Z} — angle of attack of straight stream or FEA sprayed stream along the axis *Z* of RFM 1 and RFM 2 respectively; θ_{1X} , θ_{2X} — angle of attack of straight stream or FEA sprayed stream along the axis *X* of RFM 1 or RFM 2 respectively; ω_1 , ω_2 — scanning angle range of RFM 1 and RFM 2 respectively; Δ_1 — actual coverage angle range for RFM 1; *Y*_{1,2} — *Y* axial distance between center of fire load and RFM 1, RFM 2

Based on different RFM positioning schemes at Fig. 8–11*, the sighting of targeting detector to fire area and the elevation of RFM have different angular three-dimensional positioning. To simplify and reduce wordage

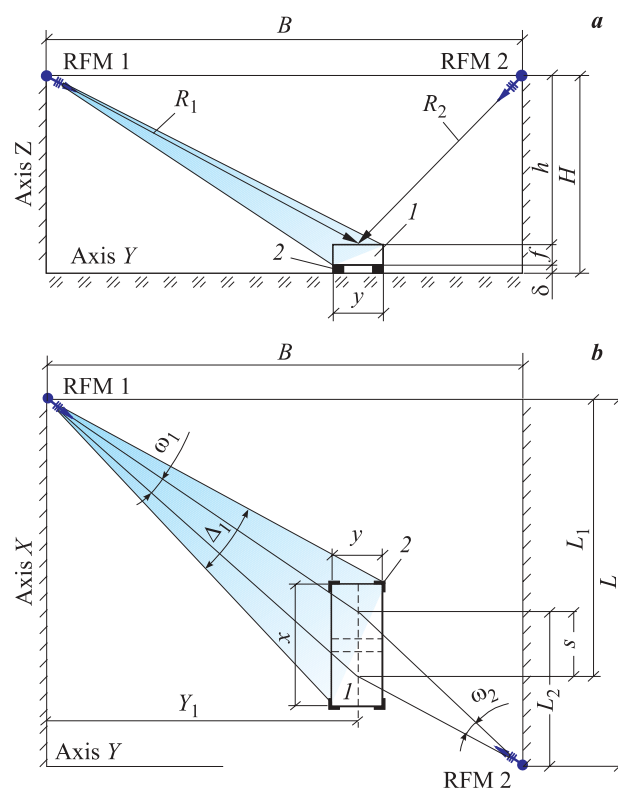


Fig. 15. RFMs positioning with respect to class B fire area (extended rectangular tray) if they are located at opposite sides and in case of scanning streams: *a* — side view; *b* — top view; 1 — fire load (extended rectangular tray); 2 — support; *B* — room width; *H* — height of RFM installation; *h* — distance between face of liquid fuel along axis *Z* and RFM rotation axis; *L*₁, *L*₂ — distance between the center of tray with liquid fuel and RFM 1 and RFM 2 respectively; *R*_{1beg}, *R*_{1end}, *R*_{2beg}, *R*_{2end} — conventional axes of straight stream or FEA sprayed stream at the beginning and end of scanning cycle of RFM 1 and RFM 2 respectively; *Y*₁ — distance between RFM 1 and center of fire load along axis *Y*; *f* — height of tray side walls; *x*, *y* — length and width of tray; ω_1 , ω_2 — scanning angle range of RFM 1 and RFM 2 respectively; Δ_1 — actual coverage angle range for RFM 1

Based on the results of measurements of stream spot, the coverage both inside the circle and inside the ellipse is uneven. The enough concentrated area with satisfactory coverage intensity is located at a distance of about 90 % of the maximum range (the far drops). The distance to this area is considered to be effective range. Stream spot area where 70 % of the supplied water falls down is the efficient coverage area. When stream vibrating, oscillating, or scanning, the coverage becomes more uniform. The effective area of coverage spot shall be taken into account when programming coverage mode subject to stream range.

* See the beginning of this article: L. M. Meshman, V. A. Bylinkin, Yu. I. Gorban, M. Yu. Gorban, K. Yu. Fokicheva. Actual problems of navigation to the fire robotic trunks in robotic fire extinguishing system. Part 1. Background to the establishment of RFS and specific characteristics of the fire fighting RFM. *Pozharovzryvbezopasnost/Fire and Explosion Safety*, 2019, vol. 28, no. 3, pp. 70–88 (in Russian). DOI: 10.18322/PVB.2019.28.03.70-88.

of material, streams contact with surface of fire load is any further considered in one plane.

2. Operating programs for RFMs used for fire suppression with static streams

2.1. Static streams positioned to the front surface ($\theta \approx 90^\circ$)

Maximum allowable fire area for static streams ($\theta \approx 90^\circ$) is calculated based on circle area S_c , that is resulted from stream or sprayed FEA contact with object to be protected.

In this case, the RFM program targets monitor by one of the following ways, based on positioning inaccuracy angle α and the dead zone angle of targeting detector β :

- under flame edge so that the lower flame edge is entirely within the contact spot of stream and surface to be protected (Fig. 16,a);
- to flame center so that the area to be protected being in fire, is entirely within the contact spot of stream and surface to be protected (Fig. 16,b).

At the same time, in all cases, the RFM operating program provides the FEA stream targeting to the fire area by:

- analyzing FEA pressure and if it changes the program changes the ballistics with respect to the vertical targeting angle (elevation angle) of monitor outlet nozzle depending on the distance to fire area and FEA pressure;
- selecting the FEA spray angle depending on the distance from RFM to fire area.

In Fig. 16,a and 16,b, the range of coverage angles, with regard to FEA spreading in horizontal direction over the protected surface, is equal to actual range of coverage angles $\sigma = \Delta$. Let us assume that in this case the RFM program, taking into account the angle of positioning inaccuracy α and dead zone angle of targeting detector β , positions RFM to the axis of BB_1 flame and determines, depending on the distance to fire area, the required FEA stream diameter D_{str} at the moment of its contact with fire surface, wherein stream diameter is bigger than flame length, i. e. $D_{str} > L_{fl}$. When RFM targeting to fire area, its monitor can move not only in

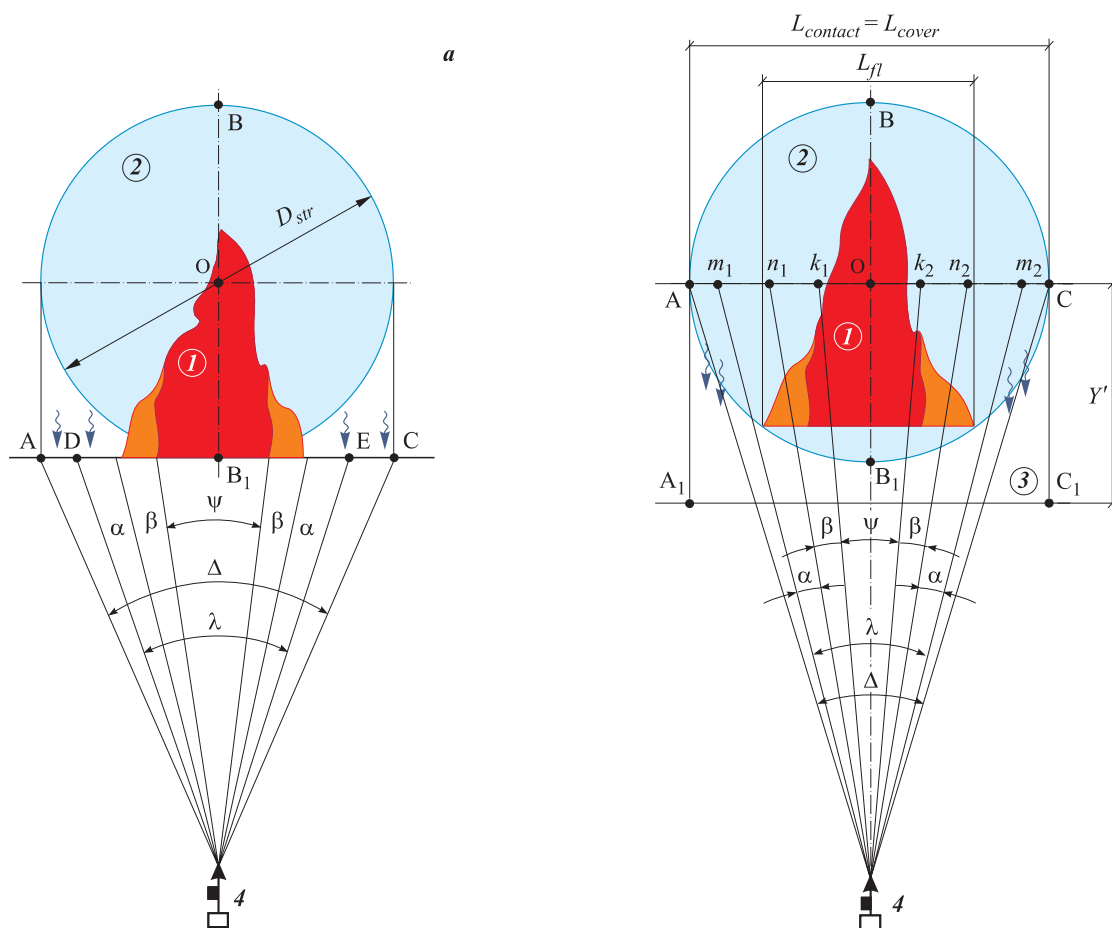


Fig. 16. Curve of frontal surface coverage with static stream with an angle of attack of $\theta \approx 90^\circ$ during its targeting: *a* — under flame edge; *b* — to flame center; 1 — flame; 2 — coverage area at the moment of stream contact with surface to be protected; 3 — additional area covered due to FEA flowing down in vertical direction; 4 — RFM; D_{str} — stream diameter at the moment of its contact with the protected surface; $L_{contact} = L_{cover} = AC$ — the length of contact and coverage area when FEA contacts with protected surface; L_{fl} — flame length; Y' — is the distance along the Y axis to the center of the flame

horizontal direction — from left to right or right to left, but also simultaneously in vertical direction — from up to down or from down to up.

If stream is supposed to be sighted along the axis of registered BB_1 fire area and it is not beyond the area of stream contact with the ABC surface, and the angle λ is not bigger than angle Δ , then static frontal stream provides the fire extinguishing. In this case, the contact spot of stream and covered surface have the following parameters:

- contact spot:

- a) in angular coordinates (hereinafter: for simplicity of description angular coordinates was taken only along axis X):

$$\Delta \geq \lambda = \psi + 2\alpha + 2\beta; \quad (1)$$

- b) in linear dimensions (hereinafter: if $R \gg D_{str}$ (where R — stream operating range) we take curve area L to be straight):

$$L_{contact} = D_{str} = AC = 2R \operatorname{tg}(\Delta/2) \geq 2R \operatorname{tg}(\psi/2 + \alpha + \beta) \quad (2a)$$

$$\text{or } L_{contact} \approx \pi \Delta R / 180 \approx \Delta R / 57.3; \quad (2b)$$

- c) area

$$S_{contact} = \pi D_{str}^2 / 4 = 0.785 D_{str}^2; \quad (3)$$

- coverage area:

- a) in angular coordinates:

$$\Delta \geq \lambda = \psi + 2\alpha + 2\beta; \quad (4)$$

- b) in linear dimensions:

$$L_{cover} = D_{str} = AC = 2R \operatorname{tg}(\Delta/2) \geq 2R \operatorname{tg}(\psi/2 + \alpha + \beta) \quad (5a)$$

$$\text{or } L_{cover} \approx \Delta R / 57.3; \quad (5b)$$

- c) coverage square area:

$$S_{cover} = S_{contact} \geq \frac{\pi D_{str}^2}{8} + Y' D_{str}^2 = \left(\frac{\pi}{8} + Y' \right) D_{str}^2. \quad (6)$$

It is assumed that, firstly, coverage intensity in S_{cover} area is not lower than in $S_{contact}$ circle, since FEA after contact with the vertical surface flows down along the Y axis; secondly, intensity and uniformity of coverage are within $Y' \approx (1.0 \div 2.0) D_{str}$. When $Y' = 0.5 D_{str}$, i. e. with coverage area limited by height $BB_1 = D \sim D_{str}$, we have:

$$S_{cover} = S_{contact} \geq \frac{\pi D_{str}^2}{8} + 0.5 D_{str}^2 = \left(\frac{\pi}{8} + 0.5 \right) D_{str}^2 \approx 0.89 D_{str}^2.$$

Whereby coverage intensity is within the limits of circle area of diameter D_{str} (see Fig. 16,a) and shall correspond to GOST R 51043–2002 and SP 5.13130.2009 [40]).

If fire area is beyond the contact spot of stream and surface S_{ABCB_1} , i. e. the angle λ is bigger than angle Δ , then conditions (4)–(6) are not fulfilled and the fire cannot be extinguished by static stream, so to extinguish fire it is necessary to increase stream diameter D_{str} , or use line scanning.

2.2. Static streams targeted at an angle to frontal surface ($0 < \theta < 90^\circ$)

For static streams targeted at an angle to frontal surface ($0 < \theta < 90^\circ$), the maximum permissible fire area is initially estimated based on ellipse area S_e generated when stream or FEA sprayed stream contact with the object to be protected.

As in the previous case, the RFM program positions monitor by one of the following ways, based on positioning inaccuracy angle α and the dead zone angle of targeting detector β :

- under flame edge so that the lower flame edge is entirely within the contact spot of stream and surface to be protected (Fig. 17,a);
- to flame center so that the area to be protected being in fire, is in coverage area along FEA contact ellipse axis (alignment of vertical flame axis with contact ellipse small axis) (Fig. 17,b).

At the moment of contact between straight stream or FEA sprayed stream with a diameter D_{str} and burning area, there appear a contact area in the form of ellipse $S_{contact} (ABCB_1A)$, which provides the overlapping of fire area.

The smaller is the angle of attack θ , the larger is the area of ellipse $S_{contact} (ABCB_1A)$ and at a constant flow rate the less is coverage intensity. Since FEA stream will slide by inertia along coverage surface in the direction of its supply (along the X axis), the coverage intensity in the middle of ellipse will not change in a certain area of semi-ellipse BDB_1 .

It is assumed that, in comparison with coverage intensity in the area of stream direct contact with surface, the coverage intensity in area located along the direction of FEA stream at a certain distance from the boundary of stream contact with covered surface at angle of attack θ from 0 to 90° varies from maximum to minimum, and vice versa, in a certain area located below the coverage line — from minimum to maximum (i. e., coverage intensity corresponding to intensity in contact area of stream and surface).

At a certain angle of attack θ , the length of additional coverage area CD may be in excess of positioning inaccuracy α_2 and the dead zone β_2 of targeting detector. In this case, the stream diameter D_{str} may even be taken somewhat less than flame width, therefore at a small angle of attack only the angle of targeting inaccuracy α_1 and dead zone angle β_1 of targeting detector can be considered.

c) coverage square area:

$$S_{contact} = \pi \cdot AC \cdot BB_1 / 4 = \pi D_{str}^2 / 4 \cdot \sin \theta; \quad (9)$$

• coverage area:

a) in angular coordinates:

$$\sigma = \Delta + \delta; \quad (10)$$

b) in linear dimensions:

$$L_{cover} = AD = (AC + CD)D_{str} / \sin \theta; \quad (11a)$$

at $\theta < 45^\circ$:

$$L_{cover} \approx (\Delta + \delta)R / 57.3 \geq (\delta + \psi + \alpha_1 + \beta_1)R / 57.3; \quad (11b)$$

at $\theta \geq 45^\circ$:

$$L_{cover} \approx (\Delta + \delta)R / 57.3 \geq (\delta + \psi + \alpha_1 + \beta_1 + \alpha_2 + \beta_2)R / 57.3; \quad (11c)$$

c) coverage square area:

$$S_{cover} \approx S_{contact} + \Delta S_h + \Delta S_v = 0.5 (S_{contact} + \Delta S_{hBDD_1}) + \Delta S_{vADD_1A_1}. \quad (12)$$

If fire area is beyond area $ABDB_1A$ and angle λ — bigger than angle σ , i. e. conditions (10)–(12) are not fulfilled, the fire cannot be extinguished by static stream. So to extinguish fire it is necessary to increase stream diameter D_{str} (as well as to increase flow rate to provide coverage intensity) or use line scanning (by increasing flow rate).

Similar rules are reasonable for static high-angled stream.

If the protected area is covered with static high-angled or frontal stream (without RFM scanning), calculation of RFM flow rate required to extinguish fire is

simplified: coverage intensity and flow rate are taken according to GOST R 51043–2002 and SP 5 [40]. While also, the operating program shall provide quasi-constant area of FEA contact spot with the protected surface (regardless distance from RFM to the protected surface) by adjusting the stream opening angle.

RFM flow rate Q (l/m^2) for static frontal stream that is supplied at angle to frontal surface or high-angled stream shall be calculated as follows:

$$Q = KiS_{contact} / \sin \theta = KiS_{cover}, \quad (13)$$

where K — flow rate ratio; $K = 1.2 \div 1.3$;

i — rated coverage intensity according to SP 5 [40], $l/(sec \cdot m^2)$.

Contact spot area of stream with surface in a form of full-circle at $\theta = 90^\circ$ shall be calculated as $S_{contact,c} = \pi D_{str}^2 / 4$, in a form of ellipse at $\theta \neq 90^\circ$ — as $S_{contact,e} = \pi D_{str}^2 / (4 \sin \theta)$.

As much as S_{cover} increases when compared to $S_{contact}$, as much FEA flow rate shall be increased. It is necessary to take this factor into account when designing the RFSS and when determining the distance between RFM that are part of RFSS, and try to adjust the angle of attack θ of each RFM as high as possible.

Conclusions

In practice, static streams are not often used in RFSS. However, the concepts introduced and the calculations given are essential for scanning streams that are widely used in RFSS directly for fire extinguishing, and they will be mentioned in the next final chapter.

To be continued

REFERENCES

1. Shanee Honig, Tal Oron-Gilad. Understanding and resolving failures in human-robot interaction: Literature review and model development. *Frontiers in Psychology*, 2018, vol. 9, article no. 861. 21 p. DOI: 10.3389/fpsyg.2018.00861.
2. *Analiticheskoye issledovaniye: mirovoy ryok robototekhniki* [Analytical study: robotic technologies world market]. Moscow, Russian Association of Robotics Publ., 2016. 157 p. (in Russian). Available at: http://robotforum.ru/assets/files/000_News/NAURR-Analiticheskoye-issledovanie-mirovogo-rinka-robototekhniki-%28yanvar-2016%29.pdf (Accessed 5 January 2019).
3. G. E. Marchant, B. Allenby, R. C. Arkin, J. Borenstein, L. M. Gaudet, O. Kittrie, P. Lin, G. R. Lucas, R. O'Meara, J. Silberman. International governance of autonomous military robots. In: K. P. Valavanis, G. J. Vachtsevanos (eds). *Handbook of unmanned aerial vehicles*. Dordrecht, Springer, 2015, pp. 2879–2910. DOI: 10.1007/978-90-481-9707-1_102.
4. Michael Møller. UN meeting targets 'killer robots'. *UN News*, 14 May 2014. Available at: <http://www.un.org/apps/news/story.asp?NewsID=47794> (Accessed 7 January 2019).
5. M. L. Cummings. Unmanned robotics and new warfare: a pilot/professor's perspective. *Harvard National Security Journal*, 24 March 2010. Available at: <http://harvardnsj.org/2010/03/unmanned-robotics-new-warfare-a-pilotprofessors-perspective/> (Accessed 7 January 2019).
6. 11 police robots patrolling around the world. *Wired*, 24 July 2016. Available at: <https://www.wired.com/2016/07/11-police-robots-patrolling-around-world/> (Accessed 5 January 2019).
7. Aleksey Boyko (ABloud). *Catalog of firefighting robots. Firefighting robots. Robotic technologies for firefighting* (in Russian). Available at: <http://robotrends.ru/robopedia/katalog-pozharnyh-robotov> (Accessed 5 January 2019).

8. Chee Fai Tan, S. M. Liew, M. R. Alkahari, S. S. S. Ranjit, M. R. Said, W. Chen, G. W. M. Rauterberg, D. Sivakumar, Sivarao. Fire fighting mobile robot: state of the art and recent development. *Australian Journal of Basic and Applied Sciences*, 2013, vol. 7, no. 10, pp. 220–230.
9. *Fire robots and fire robots technology. Product catalogue 2015–2016*. Petrozavodsk, “FR” Engineering Centre of Fire Robots Technology, LLC. Publ., 2017. 23 p. Available at: <http://www.russchinatrade.ru/assets/files/ru-offer/FR%E4%BA%A7%E5%93%81%E7%9B%AE%E5%BD%952015%E8%8B%B1%E6%96%87%E7%89%88.pdf> (Accessed 20 December 2018).
10. *Industrial robots — types and varieties. Robotic technologies, 3D printers. Top 3D company blog* (in Russian). Available at: <https://habr.com/ru/company/top3dshop/blog/403323/> (Accessed 25 December 2018).
11. Tony Melanson. *What Industry 4.0 means for manufacturers*. Available at: <https://aethon.com/mobile-robots-and-industry4-0/> (Accessed 5 January 2019).
12. *Catalog of robotic transport solutions. Transport and robots. Foreign solutions* (in Russian). Available at: <http://robotrends.ru/robopedia/katalog-resheniy-robotizirovannogo-transporta> (Accessed 10 January 2019).
13. Alexander Ruggiero, Sebastian Salvo, Chase St. Laurent. *Robotics in construction. IQP Final Report 3/24/2016*. Massport, 2016. 78 p. Available at: <http://web.wpi.edu/Pubs/E-project/Available/E-project-032316-150233/unrestricted/FinalReport.pdf> (Accessed 10 January 2019).
14. *Robots in Agriculture*. Available at: <http://www.intorobotics.com/35-robots-in-agriculture/> (Accessed 5 January 2019).
15. Juan Jesús Roldán, Jaime del Cerro, David Garzón Ramos, Pablo Garcia Aunon, Mario Garzón, Jorge de León, Antonio Barrientos. Robots in agriculture: State of art and practical experiences. In: Rolf Dieter Schraft, Gernot Schmierer. *Service Robots*. New York, A K Peters / CRC Press, 2018. 228 p. DOI: 10.5772/intechopen.69874.
16. E. van Oost, D. Reed. Towards a sociological understanding of robots as companions. In: M. H. Lamers, F. J. Verbeek (eds). *Human-Robot Personal Relationships. HRPR 2010. Lecture Notes of the Institute for Computer Sciences, Social Informatics and Telecommunications Engineering*. Heidelberg, Springer, pp. 11–18. DOI: 10.1007/978-3-642-19385-9_2.
17. A. van der Plas, M. Smits, C. Wehrmann. Beyond speculative robot ethics: a vision assessment study on the future of the robotic caretaker. *Accountability in Research*, 2010, vol. 17, issue 6, pp. 299–315. DOI: 10.1080/08989621.2010.524078.
18. A. van Wynsberghe. Designing robots for care: care centered value-sensitive design. *Science and Engineering Ethics*, 2013, vol. 19, issue 2, pp. 407–433. DOI: 10.1007/s11948-011-9343-6.
19. P. Robinette, A. Howard, A. R. Wagner. Conceptualizing overtrust in robots: why do people trust a robot that previously failed? In: W. F. Lawless, R. Mittu, D. Sofge, S. Russell (eds). *Autonomy and artificial intelligence: a threat or savior?* Cham, Springer, 2017, pp. 129–155. DOI: 10.1007/978-3-319-59719-5_6.
20. V. Efanov, M. Martynov, K. Pichkhadze. Space robots for scientific research. *Nauka v Rossii / Science in Russia*, 2012, no. 1, pp. 4–11 (in Russian).
21. L. Royakkers, R. van Est. A literature review on new robotics: automation from love to war. *International Journal of Social Robotics*, 2015, vol. 7, issue 5, pp. 549–570. DOI: 10.1007/s12369-015-0295-x.
22. S. Honig, T. Oron-Gilad. Understanding and resolving failures in human-robot interaction: Literature review and model development. *Frontiers in Psychology*, 2018, vol. 9. DOI: 10.3389/fpsyg.2018.00861.
23. Automatic system with self-targeting of fire extinguishing agents onto the fire source. *Pozharnoye delo / Fire Business*, 1970, no. 2, p. 257 (in Russian).
24. A. I. Veselov, M. G. Abdeev, P. G. Balagin. *A device for targeting of a fire extinguishing stream onto the fire source*. Inventor’s Certificate USSR, no. 257300, publ. date 11 November 1969, Bull. 35 (in Russian).
25. L. M. Meshman. *A device for targeting of a fire extinguishing stream onto the fire source*. Inventor’s Certificate USSR, no. 370950, publ. date 22 November 1973, Bull. 12 (in Russian).
26. A. I. Veselov, L. M. Meshman. *Avtomaticheskaya požaro- i vzryvozashchita predpriyatiy khimicheskoy i neftekhimicheskoy promyshlennosti* [Automatic fire and explosion safety of the chemical and petrochemical plants]. Moscow, Khimiya Publ., 1975. 280 p. (in Russian).
27. A. I. Weselow, L. M. Meschman. *Automatischer brand- und explosionschutz*. Berlin, Staatsverlag DDR, 1979. 200 sec. (in Germany).
28. N. L. Popov, Yu. I. Gorban. Fire robots. *Pozharnoye delo / Fire Business*, 1986, no. 7, pp. 20–21 (in Russian).

29. L. M. Meshman, S. N. Vereshchagin. *Sovremennaya pozharnaya robototekhnika: obzornaya informatsiya* [Modern fire robotics: Overview]. Moscow, Main Information Center of the Ministry of Internal Affairs USSR Publ., 1988. 42 p. (in Russian).
30. L. M. Meshman, V. V. Pivovarov, A. V. Gomozyov, S. N. Vereshchagin. *Pozharnaya robototekhnika. Sostoyaniye i perspektivy ispolzovaniya: obzornaya informatsiya* [Fire robotics. State and prospects of use: Overview]. Moscow, VNIPO Publ., 1992. 82 p. (in Russian).
31. L. M. Meshman, S. N. Vereshchagin, S. M. Shirokov, V. I. Aldonyasov. Ballistics of scanning streams. In: *Pozharnaya tekhnika i tusheniye pozharov* [Fire equipment and fire extinguishing]. Moscow, VNIPO Publ., 1990, pp. 61–66 (in Russian).
32. *Fire Safety Standards 84–2000. Water and foam fire extinguishing installations robotics. General technical requirements. Test methods* (in Russian). Available at: <http://docs.cntd.ru/document/1200016071> (Accessed 10 January 2019).
33. *Technical regulations for fire safety requirements*. Federal Law on 22.07.2008 No. 123 (ed. on 29.07.2017) (in Russian). Available at: <http://docs.cntd.ru/document/902111644> (Accessed 25 December 2018).
34. FM 142.1. *Approval Standard for Fire Protection Monitor Assemblies*. FM Approvals LLC, 2018. 28 p.
35. G. Jensen. *Fire fighting systems: Comparison of performances of interior and exterior applications at large wood buildings. KA PROJECT. Test report A075349. Final*. Trondheim, COWI AS, 2018. 26 p. (in Norwegian).
36. Yu. I. Gorban. *An automated fire-fighting complex integrating a television system*. European patent 2599525B, publ. date 30 December 2015, Bull. 53.
37. Yu. I. Gorban. Fire robots. *Industrial Fire Journal*, 2016, no. 103, pp. 12–13.
38. Yu. I. Gorban. *Robotized fire complex on basis of mini-fire robot-irrigators with remote access system*. Patent RU, no. 2677622, publ. date 17 January 2019, Bull. 2 (in Russian).
39. Yu. I. Gorban. *Pozharnyye roboty i stvolnaya tekhnika v pozharnoy avtomatike i pozharnoy okhrane* [Firefighting robots, fire monitors and handline nozzles in fire automatics and fire protection]. Moscow, Pozhnauka Publ., 2013. 352 p. (in Russian).
40. *Set of rules 5.13130.2009. Systems of fire protection. Automatic fire-extinguishing and alarm systems. Designing and regulations rules* (in Russian). Available at: <http://base.garant.ru/195658/> (Accessed 15 December 2018).
41. *VNPB 39–16 (STO 1682.0017–2015). Robotic fire suppression system. Design rules and regulations*. Moscow, VNIPO Publ., 2016. 84 p. (in Russian).

Received 12 January 2019; received in revised form 20 February 2019; accepted 22 February 2019

Information about the authors

Leonid M. MESHMAN, Cand. Sci. (Eng.), Senior Researcher, Leading Researcher, All-Russian Research Institute for Fire Protection of Emercom of Russia, Balashikha, Moscow Region, Russian Federation

Vladimir A. BYLINKIN, Cand. Sci. (Eng.), Head of Department, All-Russian Research Institute for Fire Protection of Emercom of Russia, Balashikha, Moscow Region, Russian Federation; ORCID: 0000-0002-4034-2510; Scopus Author ID: 6506544327; e-mail: fire404@mail.ru

Yuriy I. GORBAN, General Director, Engineering Centre of Fire Robots Technology “FR” LLC, Petrozavodsk, Republic of Karelia, Russian Federation; ORCID: 0000-0002-4452-6798; e-mail: frgroup@firerobots.ru

Mikhail Yu. GORBAN, Technical Director – Chief Project Engineer, Engineering Centre of Fire Robots Technology “FR” LLC, Petrozavodsk, Republic of Karelia, Russian Federation; ORCID: 0000-0001-9191-426X; e-mail: kristinaz@firerobots.ru

Kristina Yu. FOKICHEVA, Lead Design Engineer, Engineering Centre of Fire Robots Technology “FR” LLC, Petrozavodsk, Republic of Karelia, Russian Federation; ORCID: 0000-0003-2850-7324; e-mail: kristinaz@firerobots.ru

Проблемы использования беспилотных авиационных систем для тушения пожаров в зданиях повышенной этажности

© Д. М. Гордиенко, В. И. Логинов[✉], Ю. Н. Осипов,
В. И. Ершов, Е. Д. Михайлова

Всероссийский научно-исследовательский институт противопожарной обороны
МЧС России (Россия, 143903, г. Балашиха Московской обл., мкр. ВНИИПО, 12)

РЕЗЮМЕ

Введение. Целью исследования является демонстрация проблем, которые следует решить при реализации идей пожаротушения в зданиях повышенной этажности с использованием беспилотных авиационных систем (БАС). Для достижения поставленной цели решались следующие задачи: оценка возможностей по подаче воды и водных огнетушащих растворов в очаг пожара от наземной насосной станции по рукавной линии; анализ движения компрессионной пены по вертикально расположенной рукавной линии; оценка возможностей по использованию беспилотных авиационных систем для подачи в очаг пожара огнетушащих порошков и аэрозолей.

Аналитическая часть. В ходе исследования рассмотрены варианты пожаротушения при непрерывной подаче в очаг пожара воды или водного огнетушащего раствора от наземной насосной станции по рукавной линии, поддерживаемой беспилотным воздушным судном (БВС); при аналогичной подаче в очаг пожара компрессионной пены; при подаче в очаг пожара огнетушащих порошков и аэрозолей, запасы которых располагаются на БВС.

Заключение. Результаты исследования показывают, что одним из путей повышения возможностей по тушению пожаров в зданиях повышенной этажности может стать использование БАС для непрерывной горизонтальной подачи в очаг пожара водного раствора или компрессионной пены, а также подачи огнетушащих порошков и аэрозолей с помощью порошковых пожарных стволов и пиротехнических патронов. Однако реализация каждого из указанных способов связана с необходимостью решения определенных проблем, основными из которых являются: ограниченность возможностей по высоте пожаротушения водными растворами и большая при этом потребная грузоподъемность БВС; необходимость проведения дополнительных экспериментальных исследований в целях построения методики гидравлического расчета систем подачи компрессионной пены; потребность поиска путей обеспечения безопасности применения БАС в условиях расслоения компрессионной пены на газообразную и водную составляющие; неопределенность возможностей по созданию бортовых установок подачи в очаг пожара огнетушащих порошков и аэрозолей.

Ключевые слова: огнетушащий водный раствор; компрессионная пена; горизонтальная подача; рукавная линия; огнетушащий порошок; огнетушащий аэрозоль.

Для цитирования: Гордиенко Д. М., Логинов В. И., Осипов Ю. Н., Ершов В. И., Михайлова Е. Д. Проблемы использования беспилотных авиационных систем для тушения пожаров в зданиях повышенной этажности // Пожаровзрывобезопасность/Fire and Explosion Safety. — 2019. — Т. 28, № 4. — С. 82–91. DOI: 10.18322/PVB.2019.28.04.82-91.

✉ Логинов Владимир Иванович, e-mail: vniipo_robot@mail.ru

On unmanned aircraft systems application for fire extinguishing in high-rise buildings

© Denis M. Gordienko, Vladimir I. Loginov[✉], Yuri N. Osipov,
Vladimir I. Ershov, Elena D. Mikhaylova

All-Russian Research Institute for Fire Protection of Emercom of Russia
(VNIIPPO, 12, Balashikha, Moscow Region, 143903, Russian Federation)

ABSTRACT

Introduction. The purpose of the study is to formulate and analyze problems that should be solved before implementing the ideas of fire fighting in high-rise buildings by using unmanned aircraft systems (UAS). To achieve this purpose, the following concepts were considered and assessed: the possibilities of water and water-based fire-extinguishing solutions delivery to the fire source from a ground pumping station using a hose line; delivering compression foam along a vertically positioned hose line; and, the possibilities of UAS for fire extinguishing; supply of fire extinguishing powders and aerosols placed on the UAS to the center of fire.

Methods. The adopted in Russia hydraulic calculation methods, the results of the experimental studies on the compression foam, the existing theoretical and practical advances in the field of fire-extinguishing by jet delivering fire-extinguishing substances.

Conclusions. The results achieved show that one of the ways to increase fire extinguishing capability in high-rise buildings can be provided by applying UAS for continuous horizontal supply of water based solution or compression foam to the center of fire, as well as supply of fire extinguishing powders and aerosols using powder fire barrels and pyrotechnic cartridges. However, to implement each of these methods, certain problems need to be solved. They are: the fire extinguishing height limitations a large capacity of UAS needed; a hydraulic calculation methodology for compression foam supply systems; safe use of UAS under the conditions of compression foam separation; the possibilities for developing supply equipment, which can be utilized by the UAS.

Keywords: fire-extinguishing aqueous solution; compression foam; horizontal feed; hose line; fire-extinguishing powder; fire-extinguishing aerosol.

For citation: D. M. Gordienko, V. I. Loginov, Yu. N. Osipov, V. I. Ershov, E. D. Mikhaylova. On unmanned aircraft systems application for fire extinguishing in high-rise buildings. *Pozharovzryvobezopasnost/Fire and Explosion Safety*, 2019, vol. 28, no. 4, pp. 82–91 (in Russian). DOI: 10.18322/PVB.2019.28.04.82-91.

✉ Vladimir Ivanovich Loginov, e-mail: vniipo robote@mail.ru

Введение

Технологии применения беспилотных авиационных систем (БАС) получают все большее развитие в спасательных службах многих стран. В основном эти технологии внедряются для управления в кризисных ситуациях, выполнения контрольных функций [1, 2] и обеспечения аварийно-спасательных работ (мониторинга, контроля технического состояния объектов, их безопасности и функционирования, а также разведки очага пожара, транспортировки огнетушащих средств к очагу возгорания и т. д.). В последнее время появляются проекты по внедрению технологий применения БАС непосредственно для тушения пожаров, в том числе в зданиях повышенной этажности.

Попытки реализовать идею пожаротушения в зданиях повышенной этажности с использованием БАС предпринимались в нескольких проектах, к которым следует отнести:

- проекты подачи воды в очаг пожара от наземного источника (конструкторское бюро “Искатель” Московского авиационного института, компания Aerones (Латвия), фирма Matrix UAV (Украина), фирма Kamap Aircraft (беспилотник K-Max) (США);
- проект подачи в очаг пожара огнетушащего порошка (Китай).

Однако до полной практической завершенности эти проекты пока не доведены. По мнению авторов статьи, причина кроется в том, что не найдены приемлемые решения некоторых возникших при этом проблем, характерных для используемых в проектах огнетушащих веществ (ОТВ).

Цель исследований — показ проблем, которые следует решить при реализации идей пожаротушения в зданиях повышенной этажности с использованием БАС.

Для достижения поставленной цели решались следующие задачи: оценка возможностей по подаче

воды и водных огнетушащих растворов в очаг пожара от наземной насосной станции по рукавной линии; анализ движения компрессионной пены по вертикально расположенной рукавной линии; оценка возможностей по использованию беспилотных авиационных систем для подачи в очаг пожара огнетушащих порошков и аэрозолей.

Анализ современного состояния пожарных технологий и разработок в области создания нового пожарного оборудования и беспилотных воздушных судов (БВС), способных размещать его на борту, показывает, что в настоящее время имеет смысл рассматривать следующие варианты пожаротушения:

- 1) непрерывная подача в очаг пожара воды или водного огнетушащего раствора от наземной насосной станции по рукавной линии, поддерживаемой БВС;
- 2) аналогичная подача в очаг пожара компрессионной пены;
- 3) подача в очаг пожара огнетушащих порошков и аэрозолей, запасы которых находятся на борту БВС.

Аналитическая часть

Использование БАС для непрерывной подачи в очаг пожара воды и водных растворов

Замысел тушения пожара подачей ОТВ в очаг от наземного источника по рукавной линии заключается в непрерывной, не ограниченной по времени подаче огнетушащего вещества и электропитания от наземных источников по линиям, поддерживаемым с использованием БВС.

Претворение в жизнь данного замысла связано с реализацией схемы, согласно которой к привязной БАС подсоединяется пожарный рукав и через специальный пожарный ствол, расположенный на БВС, при условии точного наведения струи воды на очаг горения строго под нужным углом обеспечивается

тушение огня в самых труднодоступных местах, куда не могут дотянуться лестницы пожарных машин. Управление БАС осуществляется наземным оператором с помощью пульта. Электропитание для БВС подается от наземной станции, что позволяет уменьшить вес аппарата и увеличить его грузоподъемность.

В состав БАС должны входить:

- БВС вертикального взлета и посадки с требуемыми характеристиками;
- комплекты целевой нагрузки по назначению;
- наземная станция управления.

Целевая нагрузка должна включать:

- а) оборудование пожаротушения:
 - съемное оборудование для непрерывной горизонтальной подачи в очаг пожара огнетушащего состава из наземной цистерны или другого источника воды с использованием наземной насосной станции;
 - другое съемное оборудование пожаротушения, которым при необходимости можно заменить оборудование для непрерывной горизонтальной подачи огнетушащего водного состава;
- б) систему передачи видеоизображения и телеметрии в реальном времени и в режиме объективного контроля (для послепожарной обработки информации);
- в) тепловизионную камеру для ведения наблюдения в условиях низкой освещенности и для выявления очагов возгорания.

Основой для формирования требований к рассматриваемому комплексу являются характеристики оборудования для непрерывной горизонтальной подачи в очаг пожара огнетушащего водного раствора как целевой нагрузки по основному назначению.

Съемное оборудование для непрерывной горизонтальной подачи в очаг пожара огнетушащего состава из наземной цистерны или другого источника воды с использованием наземной насосной станции должно включать:

- напорные пожарные рукава усиленной конструкции с соединительными головками повышенной прочности, выдерживающие напор воды, соответствующий максимальной высоте пожаротушения;
- сменные комплекты пожарных стволов и насадков, обеспечивающие оптимальный выбор последних для конкретной ситуации;
- специальную штангу для размещения в ней пожарного ствола для выноса его выходной кромки за пределы площади, ометаемой несущими винтами БВС;
- стальной трос с оборудованием для крепления на нем каждого пожарного рукава, составля-

ющего рукавную линию, а также кабеля для подачи электроэнергии и передачи сигналов управления.

Оборудование должно состоять из стандартных элементов, обеспечивающих наиболее приемлемое сочетание возможностей по высоте пожаротушения, массе груза, поднимаемого БВС, и производительности системы подачи огнетушащего раствора (воды), определяемой секундным объемным расходом.

В таблице приведены характеристики рассматриваемой системы подачи воды, рассчитанные с использованием методики, представленной в [3, 4], с учетом развития водяного пожаротушения [5, 6].

Расчеты проведены для различных вариантов полезной нагрузки с учетом следующего:

- избыточный напор воды, создаваемый наземной насосной станцией, должен соответствовать прочности рукавной линии и, таким образом, не превышать значение 300 м вод. ст., установленное для существующих усиленных пожарных рукавов;
- должна быть обеспечена наименьшая потребная грузоподъемность БВС, для чего рассматриваются рукавные линии с небольшими внутренними диаметрами.

Значения внутреннего диаметра положены в основу вариантов полезной нагрузки, подвешиваемой к аппарату:

- вариант 1: рукавная линия диаметром 25 мм (масса 1 м линии с водой — 0,661 кг), трос диаметром 5 мм для подвески рукавов (масса 1 м — 0,087 кг, грузоподъемность — 300 кг), кабель для подачи электроэнергии и передачи команд управления (масса 1 м — 0,011 кг);
- вариант 2: рукавная линия диаметром 38 мм (масса 1 м линии с водой — 1,394 кг), трос диаметром 7 мм для подвески рукавов (масса 1 м — 0,171 кг, грузоподъемность — 588 кг), кабель для подачи электроэнергии и передачи команд управления;
- вариант 3: рукавная линия диаметром 51 мм (масса 1 м линии с водой — 2,393 кг), трос диаметром 9 мм для подвески рукавов (масса 1 м — 0,282 кг, грузоподъемность — 970 кг), кабель подачи электроэнергии и передачи команд управления.

Анализ данных таблицы показывает, что при реализации горизонтального пожаротушения в зданиях повышенной этажности с использованием БАС могут возникнуть проблемы, связанные с недоступностью очагов горения, находящихся на высоте более 280–290 м, и большой потребной грузоподъемностью БВС.

Так, нормальный рабочий избыточный напор воды перед пожарными стволами типа РС-50 и РС-70

Характеристики системы подачи воды от наземной насосной станции в очаг пожара с использованием БАС (пожарные стволы типа РС-50/РС-70)

Characteristics of the water supply system from the ground pumping station to the fire with the use of UAS (fire trunks type RS-50/RS-70)

Режим подачи воды Water supply mode	Сравниваемые характеристики Compared characteristics	Вариант подвешиваемой полезной нагрузки (внутренний диаметр рукавной линии, мм) Suspended payload option (inner diameter of the sleeve line, mm)		
		1 (25)	2 (38)	3 (51)
Рабочий напор перед стволом 40 м вод. ст., длина струи 28–32 м Working head in front of the barrel of 40 m of water column, the length of the jet 28–32 m	Напор перед пожарным стволом, м вод. ст. Pressure in front of the fire barrel, m of water column	40	40	40
	Реакция струи, Н / Jet reaction, N	103,9/222,5	103,9/222,5	103,9/222,5
	Расход воды, л/с / Water consumption, l/sec	3,60/7,40	3,60/7,40	3,60/7,40
	Ожидаемое время тушения пожара в помещении офиса площадью 25 м ² , с The expected time of fire extinguishing in the office area of 25 m ² , sec	250/122	250/122	250/122
	Максимальная высота пожаротушения, м The maximum height of the sprinkler, m	158/70	218/143	240/192
	Масса подвешиваемой полезной нагрузки, кг The mass of the suspended payload, kg	118/52	341/224	642/514
Напор перед стволом, обеспечивающий длину струи ~5 м Pressure in front of the barrel, providing the length of the jet of ~5 m	Напор перед пожарным стволом, м вод. ст. Pressure in front of the fire barrel, m of water column	3,9/3,8	3,9/3,8	3,9/3,8
	Реакция струи, Н / Jet reaction, N	10,2/21,1	10,2/21,1	10,2/21,1
	Расход воды, л/с / Water consumption, l/sec	1,12/2,28	1,12/2,28	1,12/2,28
	Ожидаемое время тушения пожара в помещении офиса площадью 25 м ² , с The expected time of fire extinguishing in the office area of 25 m ² , sec	804/395	804/395	804/395
	Максимальная высота пожаротушения, м The maximum height of the sprinkler, m	279/235	290/275	294/287
	Масса подвешиваемой полезной нагрузки, кг The mass of the suspended payload, kg	209/176	454/430	786/768

Примечание. Над чертой приведены данные для РС-50, под чертой — для РС-70.

Note. Above the line are data for the RS-50, below the line — for the RS-70.

составляет 40 м вод. ст., что обеспечивает определенные, указанные в таблице, расход воды и ожидаемое время тушения пожара (в рассматриваем примере — в помещении офиса площадью 25 м²). При этом пожаротушение можно осуществлять с расстояния 28–32 м, определяемого длиной сплошной струи, создаваемой пожарным стволом. Однако эти характеристики могут быть обеспечены лишь при некоторой высоте пожаротушения (158–240 м для РС-50, 70–192 м для РС-70), а ее превышение приводит к падению избыточного напора и ухудшению остальных параметров. При увеличении высоты пожаротушения для РС-50 / РС-70 до значений 279–294 / 235–287 м, при которых длина сплошной струи уменьшается до величины, безопасной для применения БАС (принимаемой равной 5 м), напор воды перед стволом и расход воды в системе уменьшаются. При этом ожидаемое время тушения пожара увеличивается приблизительно в 3 раза.

Изменение варианта подвешиваемой к БВС полезной нагрузки в сторону увеличения диаметра рукавной линии, в свою очередь, приводит к росту как максимальной высоты пожаротушения, так и массы полезной нагрузки, т. е. параметров, желаемые тенденции к изменению которых являются противоположными. В связи с этим дополнительно возникает проблема выбора рационального варианта оснащения БАС оборудованием для тушения пожаров. Ее решение зависит от ожидаемых условий и должно осуществляться с использованием методов многокритериальной оценки [7].

Использование БАС для непрерывной подачи в очаг пожара компрессионной пены

Одним из способов повысить возможности по горизонтальному тушению пожаров в зданиях повышенной этажности с использованием БАС может быть применение в качестве ОТВ компрессионной

пены, подавать которую в очаг пожара предусматривается от наземного источника по рукавной линии. Этому способствует ряд ее свойств, использовать которые в последнее время предлагается в инженерных и научных кругах как в России и Белоруссии [8–13], так и на Западе [14–16].

Основным свойством компрессионной пены, способствующим повышению возможностей БАС по рассматриваемому виду пожаротушения, является ее легкость. В зависимости от кратности компрессионная пена в 10–60 раз легче воды и огнетушащих водных растворов [8], а масса рукавной линии, заполненной этой пеной, более чем в 2 раза меньше массы рукавной линии, заполненной водой [9, 14]. В связи с этим можно ожидать, что желаемая высота пожаротушения 400 м и более будет достигнута даже при меньшей грузоподъемности БВС.

При этом, как показывают исследования [8, 14], использование компрессионной пены обеспечит такие важные для применения БАС дополнительные преимущества перед водными растворами, как:

- экономия воды (до 7 раз) и пенообразователя (ПО);
- меньший требуемый напор перед пожарным стволом (20–30 м вод. ст. по сравнению с 80 м вод. ст. для установок типа “Пурга”);
- меньшая сила реакции пожарного ствола;
- большая дальность действия струи при одинаковом расходе огнетушащего состава.

Кроме того, “сухая” компрессионная пена хорошо прилипает к вертикальным поверхностям, создавая слой, защищающий объект от распространения огня и теплового излучения очага пожара. Вода же и пена, образуемые в пожарном стволе при подаче водных растворов, обладают большей подвижностью и более высокой способностью к стеканию на нижнюю поверхность объекта пожаротушения.

Однако, наряду с перечисленными положительными свойствами, существуют и факторы, которые создают проблемы, мешающие использованию компрессионной пены при тушении пожаров в высотных зданиях с применением БАС. Основной из таких проблем является недостаточная изученность взаимосвязи параметров состояния и движения компрессионной пены в системе, включающей установку для получения газонаполненной пены (УГНП), рукавную линию и пожарный ствол, что требует проведения дальнейших экспериментальных исследований. Наиболее широко представленные в открытых научных источниках результаты исследований по рассматриваемой тематике, проведенных в МЧС Республики Беларусь, показывают, что вид зависимости удельных потерь давления от объемного расхода воды и ПО существенно отличается от аналогичной зависимости при движении воды [9–11].

В связи с этим использовать существующие методики гидравлического расчета рукавных линий в случае применения компрессионной пены нельзя. Для того чтобы это стало возможно, требуется провести дополнительные целенаправленные экспериментальные исследования, результатом которых должна быть разработка методики гидравлического расчета систем как горизонтальной, так и вертикальной подачи компрессионной пены.

В целях наглядности демонстрации отличий между динамикой потоков водного раствора и компрессионной пены на рис. 1 и 2 представлены зависимости напора воды, а также смеси воды и ПО от их объемных расходов и высоты пожаротушения при использовании рукавных линий диаметром 51 мм и пожарных стволов с насадком диаметром 24 мм. Первая зависимость построена для упрощенной схе-

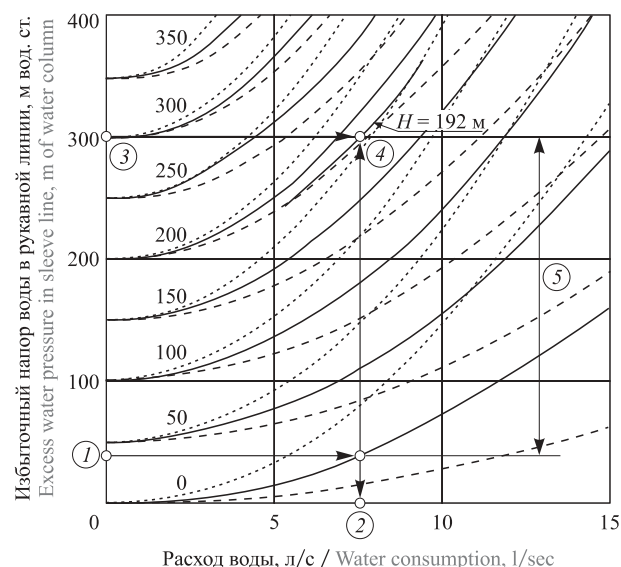


Рис. 1. Зависимость избыточного напора воды от ее расхода и высоты пожаротушения (значения у кривых, м) при использовании рукавной линии с внутренним диаметром 51 мм и пожарного ствола типа РС-70 с диаметром насадка 16 мм (.....); 19 мм (—) и 24 мм (— —); схема взаимосвязи между параметрами системы подачи воды с насадком диаметром 19 мм: 1 — рабочий напор воды перед пожарным стволом (40 м вод. ст.); 2 — потребный расход воды в системе ее подачи (7,4 л/с); 3 — располагаемый напор воды, создаваемый насосной станцией (300 м вод. ст.); 4 — максимальная высота пожаротушения (192 м — интерполяция между кривыми графика); 5 — потери напора в рукавной линии

Fig. 1. Dependence of excess water pressure on its flow rate and fire-fighting height when using a sleeve line with an internal diameter of 51 mm and a fire trunk of the RS-70 type nozzle diameter 16 mm (.....); 19 mm (—) and 24 mm (— —); scheme of the relationship between the parameters of the water supply system with a nozzle diameter of 19 mm: 1 — working water pressure in front of the fire barrel (40 m of water column); 2 — consumption of water in the system of its supply (7.4 l/sec); 3 — the available water pressure created by the pumping station (300 m of water column); 4 — the maximum height of the fire (192 m — interpolation between the curves of the graph); 5 — loss of pressure in the sleeve line

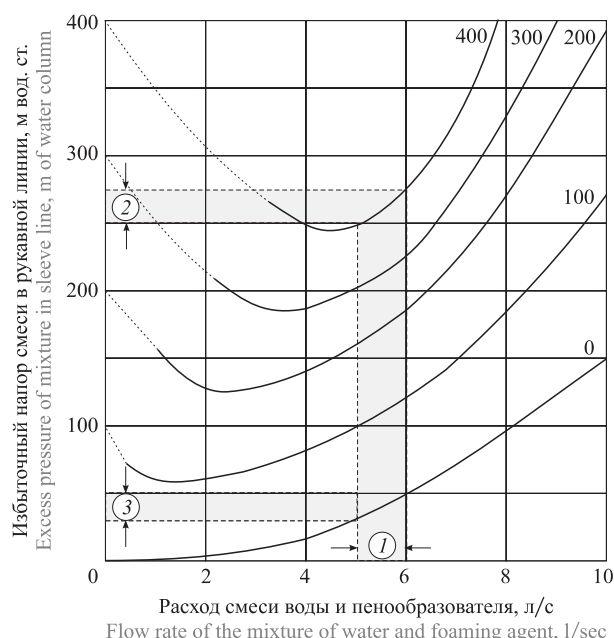


Рис. 2. Вероятный вид зависимости избыточного напора смеси в рукавной линии от объемного расхода воды и ПО и высоты пожаротушения (значения у кривых, м) компрессионной пеной кратностью 8 с использованием рукавной линии диаметром 51 мм и пожарного ствола с насадком диаметром 24 мм: 1, 2, 3 — рабочие диапазоны соответственно расхода воды и ПО, избыточного напора компрессионной пены, создаваемого УГНП, и напора перед пожарным стволом при пожаротушении на высоте 400 м

Fig. 2. The probable type of dependence of the excess pressure of the mixture in the sleeve line on the volume flow of water and foaming agent and the height of the fire extinguishing compression foam multiplicity 8 using a sleeve line with a diameter of 51 mm and a fire barrel with a nozzle diameter of 24 mm: 1, 2, 3 — operating ranges, respectively, the flow rate of the mixture of water and foaming agent, the excess pressure of the compression foam generated by the installation for production of gas-filled foam, and the pressure in front of the fire barrel during fire fighting at an altitude of 400 m

мы подачи воды в соответствии с существующей методикой гидравлического расчета, вторая — приближенно в соответствии с информацией, представленной в [12]. На рис. 1 в графическом виде показан алгоритм оценки параметров системы подачи воды. Этот же алгоритм справедлив и для оценки параметров системы подачи компрессионной пены, в которой потери напора на преодоление веса столба пены определяются с учетом ее реальной плотности. На рис. 1 потери напора в рукавной линии составляют: $300 - 40 = 260$ м вод. ст., из них потери напора на преодоление веса столба воды высотой, равной высоте пожаротушения, — 192 м вод. ст., потери на преодоление гидравлического сопротивления — $260 - 192 = 68$ м вод. ст.

Одним из различий между зависимостями, представленными на рис. 1 и 2, является то, что гидравлические потери напора в рукавной линии и пожарном стволе при движении компрессионной пены

выше, чем при движении воды, что подтверждается результатами экспериментальных исследований, представленными в [10]. Суммарное же проявление гидравлического сопротивления и веса столба компрессионной пены в рукавной линии таково, что пожаротушение может быть обеспечено на высоте 400 м и более. При этом масса рукавной линии диаметром 51 мм, длиной 400 м с компрессионной пеной кратностью 8 и с тросом поддержки составляет 375 кг, а это примерно в 2 раза меньше, чем масса такой же линии (768–786 кг) длиной около 300 м при использовании воды.

Основное же различие между рассматриваемыми зависимостями заключается в следующем. Зависимость напора воды от ее расхода является квадратичной с минимумом при нулевом расходе (это характерно для несжимаемых жидкостей). Для напора же компрессионной пены зависимость несколько отличается от квадратичной, но также имеет выраженный минимум, который проявляется при отличном от нуля расходе воды и ПО, а по мере роста высоты пожаротушения сдвигается в сторону увеличения расхода. Это объясняется возрастанием газосодержания потока при движении компрессионной пены по рукавной линии и изменением параметров газожидкостного потока (скорость, плотность). При небольших расходах воды и ПО изменение параметров потока вызывает интенсивное расслоение его на газообразную и водную составляющие в пределах рукавной линии, что в конечном счете приводит к заполнению ее водным раствором и повышению напора за УГНП. Поэтому общая тенденция растущей зависимости нарушается, и при некотором значении расхода смеси создается минимум напора. При увеличении же высоты пожаротушения увеличивается длина рукавной линии, и заполнение ее водным раствором, вероятно, происходит даже при больших расходах воды и ПО, что проявляется в смещении минимума в сторону увеличения расхода.

Рассмотренное явление способствует тому, что для каждой высоты пожаротушения компрессионной пеной устанавливаются свои взаимосвязанные рабочие диапазоны расхода воды и ПО, напора перед пожарным стволом и напора, создаваемого УГНП, с верхними и нижними пределами. Верхний предел рабочего диапазона определяется возможностями пожарной техники и оборудования: УГНП — по созданию расхода или избыточного напора воды и ПО при заданной кратности пены; рукавной линии и пожарного ствола — по допустимому избыточному напору. На нижний предел рабочего диапазона влияет процесс расслоения потока компрессионной пены. Выход параметров системы подачи смеси за этот предел приведет к заполнению рукавной линии раствором воды и ПО, возникновению противоавле-

ния столба жидкости и, как следствие, к переходу автоматики подачи пены в аварийный режим, в результате чего подача компрессионной пены прекратится [12]. В ходе экспериментов, результаты которых представлены в [12], рукавная линия не выдерживала веса находящегося в ней раствора воды и ПО, и происходил обрыв пожарного рукава в месте крепления соединительной головки.

Явление возможного заполнения рукавной линии раствором воды и ПО необходимо учитывать при планировании мероприятий по обеспечению безопасности применения БАС. Упущения в данном вопросе могут привести к тому, что БВС в критических ситуациях не сможет удержать конструкцию линии подачи пены, что может привести к катастрофическим последствиям. Данная ситуация может возникнуть как в случае ошибок в выдерживании режима подачи пены, так и при временном прекращении процесса пожаротушения. По данным исследований [9, 12] закрытие ствола более чем на 1 мин приводит к образованию в рукавной линии воздушной пробки, стеканию жидкой фазы в нижнюю часть вертикальной рукавной линии и подъему газовой фазы. При последующем открытии ствола через него из рукавной линии первоначально выходил воздух, что сопровождалось сильными рывками ствола. При пожаротушении на высоте около 100 м поток нормализовался через 1–2 мин, и в системе восстановилась подача компрессионной пены.

Из представленных на рис. 2 данных следует, что пожаротушение компрессионной пеной кратностью 8 в высотном здании с использованием БВС может быть обеспечено на высоте 400 м при расходе воды и ПО 5–6 л/с, при избыточном напоре, создаваемом УГНП, 250–275 м вод. ст. и напоре перед пожарным стволом 30–50 м вод. ст. Однако следует иметь в виду, что значения указанных параметров являются приблизительными, а о точных можно судить только после проведения специальных экспериментальных исследований.

Если в реальных условиях тушение пожара на данной высоте не обеспечивается, то проблема может быть решена путем увеличения кратности пены. Так, по данным исследования [13] повышение кратности компрессионной пены с 8 до 20 обеспечивает снижение потерь избыточного напора в рукавной линии диаметром 51 мм в 2 раза. Для рукавной линии большего диаметра степень снижения потерь напора выше. Так, потери напора в рукавной линии диаметром 66 мм снижаются в 3 раза.

Кроме того, при разработке БАС необходимо учитывать, что постоянно протекающий процесс изменения параметров газожидкостного потока сопровождается некоторой тряской рукавной линии, что может повлиять на устойчивость и управляемость БВС.

Использование БАС для подачи в очаг пожара огнетушащих порошков и аэрозолей

Другим способом расширения возможностей по тушению пожаров в зданиях повышенной этажности с использованием БАС может быть применение огнетушащих порошков и аэрозолей.

Тушение пожаров огнетушащими порошками в настоящее время обычно осуществляется путем их подачи:

- через насадки, расположенные непосредственно в защищаемых помещениях;
- в виде струй, создаваемых порошковыми пожарными стволами;
- с использованием взрывчатых веществ;
- с реализацией вихрепорошкового способа тушения горящего нефтяного или газового фонтана.

Естественно, для внешнего пожаротушения в зданиях повышенной этажности с использованием БАС приемлемыми являются второй и третий способы подачи порошков.

При реализации струйного варианта пожаротушения для формирования и направления струи в очаг пожара используются специальные порошковые пожарные стволы. При этом, кроме ствола, полезная нагрузка БВС должна включать сосуд для хранения огнетушащего порошка, баллоны с газом или компрессорную установку в составе пожарно-технического оборудования. К настоящему времени данный вариант пожаротушения теоретически обоснован [17, 18] и нашел применение при использовании специальных пожарных автомобилей. Определение же возможностей по созданию аналогичного оборудования для размещения на борту БВС пока затруднительно.

Наиболее доступный способ применения порошковой системы с взрывчатыми веществами с беспилотной платформы может быть основан на пуске и подрыве специального пиротехнического патрона, аналогичного модулю порошкового пожаротушения ручного пуска типа МПП (Н-Р)-5-И-ГЭ-У2. Пиротехнический патрон должен состоять из металлического корпуса, в котором размещаются огнетушащий порошок, газогенерирующий и пусковой элементы. Сопловое отверстие для выхода огнетушащего порошка должно быть перекрыто мембраной. При попадании патрона в очаг пожара газогенерирующий элемент вырабатывает газ, огнетушащий порошок вспушивается и внутри патрона создается избыточное давление, необходимое для вскрытия запорной мембраны. После этого огнетушащий порошок выбрасывается через щелевое отверстие в зону горения. Выброс порошка должен происходить менее чем за 1 с, что позволит сбить пламя динамической ударной волной. Кроме того, огнетушащий порошок перекрывает доступ кислорода к горящим материалам (веществам) и гасит огонь.

Аэрозольное пожаротушение зачастую рассматривается как вид порошкового пожаротушения с получением порошков в результате сгорания аэрозольобразующих огнетушащих составов. При использовании БАС для аэрозольного пожаротушения также целесообразно применять подрыв пиротехнических патронов. В качестве аналога этих патронов может выступать ручная огнетушащая пожарная граната типа “Спасатель-01” (SAT119). Патрон представляет собой резервуар со специальным составом воды и химических веществ, которые, смешиваясь при повреждении колбы в результате выстрела в очаг пожара, моментально нейтрализуют огонь.

Доставка рассмотренных пиротехнических патронов с борта БВС в очаг пожара может осуществляться специальным устройством, аналогичным ИСТА 100, 150, 240.

Несмотря на ряд исследований [19, 20] по изучению процессов порошкового и аэрозольного пожаротушения, в настоящее время все же остается проблема, связанная с неопределенностью возможностей по созданию соответствующих пиротехнических патронов и установок, которые могут быть размещены на борту БВС.

Заключение

Таким образом, одним из путей повышения возможностей по тушению пожаров в зданиях повышенной этажности может стать использование БАС для непрерывной горизонтальной подачи в очаг пожара водного раствора или компрессионной пены,

а также для подачи огнетушащих порошков и аэрозолей с помощью порошковых пожарных стволов и пиротехнических патронов. Однако реализация каждого из указанных способов связана с определенными проблемами:

- а) при горизонтальном пожаротушении водой и водными растворами — с недоступностью очагов горения, находящихся на высоте более 280–290 м, и большой потребной грузоподъемностью БВС;
- б) при горизонтальном пожаротушении компрессионной пеной:
 - с необходимостью проведения дополнительных экспериментальных исследований в целях создания методики гидравлического расчета систем горизонтальной и вертикальной подачи пены;
 - с потребностью поиска путей обеспечения безопасности применения БАС в условиях расслоения пены на газообразную и водную составляющие и заполнения рукавной линии раствором воды и ПО в начале и по окончании пожаротушения при ошибках в установке параметров подачи пены и при вынужденной приостановке ее подачи;
- в) при применении огнетушащих порошков и аэрозолей — с неопределенностью возможностей по созданию соответствующего оборудования и установок, которые могут быть размещены на борту БВС.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Павлов Е. В., Картеничев А. Ю., Николаева Е. Ю. Тактика применения беспилотных летательных аппаратов при тушении пожаров // Пожарная безопасность. — 2013. — № 2. — С. 104–107.
2. Калач А. В., Калач Е. В., Вытовтов А. В. Использование беспилотных воздушных судов для обеспечения пожарной безопасности линейных объектов нефтегазовой отрасли // Пожаровзрывобезопасность/Fire and Explosion Safety. — 2018. — Т. 27, № 12. — С. 49–55. DOI: 10.18322/PVB.2018.27.12.49-55.
3. Гидравлика и противопожарное водоснабжение : учебник / Под ред. Ю. Г. Абросимова. — М. : Академия ГПС МЧС России, 2003. — 392 с.
4. Качанов И. В., Карпенчук И. В., Красовский А. И. Сопротивление пожарных стволов // Вестник Белорусского национального технического университета. — 2010. — № 2. — С. 58–63.
5. Былинкин В. А., Губин Р. Ю., Мешман Л. М., Романова Е. Ю. Водяное пожаротушение и основные аспекты его развития в институте // Пожарная безопасность. — 2012. — № 2. — С. 131–141.
6. Логинов В. И., Ртищев С. М., Козырев В. Н., Брыксин П. В. Пожарное рукавное оборудование — история, современное состояние, перспективы развития // Пожарная безопасность. — 2012. — № 2. — С. 150–157.
7. Савин М. В. Исследование пригодности современных математических методов для выбора рациональных типов беспилотных авиационных систем // Актуальные проблемы пожарной безопасности : материалы XXVIII Международной научно-практической конференции. — М. : ВНИИПО, 2016. — Часть 2. — С. 40–48.
8. Синельникова Е. А., Слепцова И. Н., Кротова А. А. Пожарные ручные стволы для подачи компрессионной пены // Актуальные проблемы пожарной безопасности : материалы XXVIII Международной научно-практической конференции. — М. : ВНИИПО, 2016. — Часть 2. — С. 143–147.

9. Камлюк А. Н., Грачулин А. В. Особенности применения пеногенерирующих систем со сжатым воздухом для тушения пожаров // Вестник Университета гражданской защиты МЧС Беларуси. — 2018. — Т. 2, № 2. — С. 168–175.
10. Камлюк А. Н., Грачулин А. В. Инженерная методика гидравлического расчета прорезиненных рукавных линий пеногенерирующих систем со сжатым воздухом // Вестник Фонда фундаментальных исследований. — 2017. — № 1(79). — С. 51–62.
11. Грачулин А. В. Методы применения пеногенерирующих систем со сжатым воздухом для тушения пожаров : автореф. дис. ... канд. техн. наук. — Минск, 2017. — 24 с.
12. Камлюк А. Н., Навроцкий О. Д., Грачулин А. В. Тушение пожаров пеногенерирующими системами со сжатым воздухом // Вестник Университета гражданской защиты МЧС Беларуси. — 2017. — Т. 1, № 1. — С. 44–53.
13. Федяев В. Д. Применение компрессионной пены в насосно-рукавных системах при тушении пожаров электрооборудования под напряжением : дис. ... канд. техн. наук. — М., 2017. — 158 с.
14. Taylor R. G. Technical Report 98: Compressed air foam systems in limited staffing conditions. — Morristown, New Jersey : Morristown Fire Bureau, 1998. — P. 75–112.
15. Colletti D. J. Compressed air foam systems and fire hose // Fire Engineering. — 1996. — Vol. 149. — P. 50–52.
16. McLaughlin W. L. Properties of compressed air foam: executive leadership. — Friday Harbour, Washington : San Juan County Fire District No. 3, 2001.
17. Баратов А. Н., Возман Л. П., Бухтояров Д. В., Чибисов А. Л. Порошковое пожаротушение // Пожарная безопасность. — 2012. — № 2. — С. 120–122.
18. Ульянов Н. И. Обоснование параметров струеобразующих устройств для подачи огнетушащих порошковых составов : дис. ... канд. техн. наук. — М., 2000. — 206 с.
19. Сабинин О. Ю., Агаларова С. М. Огнетушащие порошки. Проблемы. Состояние вопроса // Пожаровзрывобезопасность/Fire and Explosion Safety. — 2007. — Т. 16, № 6. — С. 63–68.
20. Агафонов В. В., Копылов Н. П. Установки аэрозольного пожаротушения: элементы и характеристики, проектирование, монтаж и эксплуатация. — М. : ВНИИПО, 1999. — 232 с.

REFERENCES

1. E. V. Pavlov, A. Yu. Kartenichev, E. Yu. Nikolaeva. Tactics of application of pilotless flying devices at suppression of fires. *Pozharnaya bezopasnost / Fire Safety*, 2013, no. 2, pp. 104–107 (in Russian).
2. A. V. Kalach, E. V. Kalach, A. V. Vytovtov. Use of free aircraft for ensuring the fire safety of linear objects of oil and gas industry. *Pozharovzryvobezopasnost/Fire and Explosion Safety*, 2018, vol. 27, no. 12, pp. 49–55 (in Russian). DOI: 10.18322/PVB.2018.27.12.49-55.
3. Yu. G. Abrosimov (ed.). *Gidravlika i protivopozharnoye vodosnabzheniye* [Hydraulics and fire water supply]. Moscow, State Fire Academy of Emercom of Russia Publ., 2003. 392 p. (in Russian).
4. I. V. Kachanov, I. V. Karpenchuk, A. I. Krasovskiy. Resistance of fire-hose barrels. *Vestnik Belorusskogo natsionalnogo tekhnicheskogo universiteta / Vestnik of Belarusian National Technical University*, 2010, no. 2, pp. 58–63 (in Russian).
5. V. A. Bylinkin, R. Yu. Gubin, L. M. Meshman, E. Yu. Romanova. Water extinguishment and aspects of its development in the institute. *Pozharnaya bezopasnost / Fire Safety*, 2012, no. 2, pp. 131–141 (in Russian).
6. V. I. Loginov, S. M. Rtishchev, V. N. Kozyrev, P. V. Bryksin. History, state-of-the-art and design prospects of fire-fighting hoses. *Pozharnaya bezopasnost / Fire Safety*, 2012, no. 2, pp. 150–157 (in Russian).
7. M. V. Savin. Investigation of the suitability of modern mathematical methods for the selection of rational types of unmanned aircraft systems. In: *Aktualnyye problemy pozharnoy bezopasnosti. Materialy XXVIII Mezhdunarodnoy nauchno-prakticheskoy konferentsii* [Actual problems of fire safety. Proceedings of XXVIII International Scientific and Practical Conference]. Moscow, VNIPO Publ., 2016, part 2, pp. 40–48 (in Russian).
8. E. A. Sinelnikova, I. N. Sleptsova, A. A. Krotova. Fire hand trucks for compression foam supplying. In: *Aktualnyye problemy pozharnoy bezopasnosti. Materialy XXVIII Mezhdunarodnoy nauchno-prakticheskoy konferentsii* [Actual problems of fire safety. Proceedings of XXVIII International Scientific and Practical Conference]. Moscow, VNIPO Publ., 2016, part 2, pp. 143–147 (in Russian).
9. A. N. Kamlyuk, A. V. Grachulin. Particularities of extinguishing by compressed air foam systems. *Vestnik Universiteta grazhdanskoj zashchity MChS Belarusi / Journal of Civil Protection*, 2018, vol. 2, no. 2, pp. 168–175 (in Russian).

10. A. N. Kamluk, A. V. Grachulin. Engineering method of hydraulic calculation of rubber hose lines of compressed air foam system. *Vestnik Fonda fundamentalnykh issledovaniy / Vestnik of the Foundation for Fundamental Research*, 2017, no. 1(79), pp. 51–62 (in Russian).
11. A. V. Grachulin. *Methods of application of compressed air foam systems for extinguishing fires*. Abstr. Cand. Sci. (Eng.) Diss. Minsk, 2017. 24 p. (in Russian).
12. A. N. Kamluk, O. D. Nawrocki, A. V. Grachulin. Fire extinguishing by compressed air foam systems. *Vestnik Universiteta grazhdanskoy zashchity MChS Belarusi / Journal of Civil Protection*, 2017, vol. 1, no. 1, pp. 44–53 (in Russian).
13. V. D. Fedyaev. *Application of compression foam in pumping-hose systems for extinguishing fires of electrical equipment under voltage*. Cand. Sci. (Eng.) Diss. Moscow, 2017. 158 p. (in Russian).
14. R. G. Taylor. *Technical Report 98: Compressed air foam systems in limited staffing conditions*. Morristown, New Jersey, Morristown Fire Bureau, 1998, pp. 75–112.
15. D. J. Colletti. Compressed air foam systems and fire hose. *Fire Engineering*, 1996, vol. 149, pp. 50–52.
16. W. L. McLaughlin. *Properties of compressed air foam: executive leadership*. Friday Harbour, Washington, San Juan County Fire District No. 3, 2001.
17. A. N. Baratov, L. P. Vogman, D. V. Bukhtoyarov, A. L. Chibisov. Dry powder extinguishment. *Pozhar-naya bezopasnost' / Fire Safety*, 2012, no. 2, pp. 120–122 (in Russian).
18. N. I. Ulyanov. Substantiation of jet-forming devices parameters for the fire extinguishing powder compositions supply. Cand. Sci. (Eng.) Diss. Moscow, 2000. 206 p. (in Russian).
19. O. Yu. Sabinin, S. M. Agalarova. Fire extinguishing powders. Problems. State of the question. *Pozharo-vzryvobezopasnost'/Fire and Explosion Safety*, 2007, vol. 16, no. 6, pp. 63–68 (in Russian).
20. V. V. Agafonov, N. P. Kopylov. *Ustanovki aerosolnogo pozharotusheniya: elementy i kharakteristiki, proyektirovaniye, montazh i ekspluatatsiya* [Aerosol fire extinguishing installations: Elements and characteristics, design, installation and operation]. Moscow, VNIPO Publ., 1999. 232 p. (in Russian).

Поступила 23.05.2019; после доработки 22.06.2019; принята к публикации 26.06.2019
 Received 23 May 2019; received in revised form 22 June 2019; accepted 26 June 2019

Информация об авторах

ГОРДИЕНКО Денис Михайлович, д-р техн. наук, начальник ВНИИПО МЧС России, г. Балашиха Московской области, Российская Федерация;
 ORCID: 0000-0002-5849-6956; e-mail: vniipo@mail.ru

ЛОГИНОВ Владимир Иванович, д-р техн. наук, старший научный сотрудник, главный научный сотрудник НИЦ пожарно-спасательной и робототехники, ВНИИПО МЧС России, г. Балашиха Московской области, Российская Федерация; ORCID: 0000-0003-1418-8780;
 e-mail: vniipo_robot@mail.ru

ОСИПОВ Юрий Николаевич, канд. воен. наук, профессор, ведущий научный сотрудник НИЦ пожарно-спасательной и робототехники, ВНИИПО МЧС России, г. Балашиха Московской области, Российская Федерация;
 ORCID: 0000-0002-6668-1844;
 e-mail: vniipo_robot@mail.ru

ЕРШОВ Владимир Иванович, канд. воен. наук, доцент, старший научный сотрудник НИЦ пожарно-спасательной и робототехники, ВНИИПО МЧС России, г. Балашиха Московской области, Российская Федерация; ORCID: 0000-0001-9064-2805; e-mail: vniipo_robot@mail.ru

МИХАЙЛОВА Елена Дмитриевна, канд. техн. наук, ведущий научный сотрудник НИЦ нормативно-технических проблем пожарной безопасности, ВНИИПО МЧС России, г. Балашиха Московской области, Российская Федерация; ORCID: 0000-0002-5847-9590;
 e-mail: chaika-med@yandex.ru

Information about the authors

Denis M. GORDIENKO, Dr. Sci. (Eng.), Head of All-Russian Research Institute for Fire Protection of Emercom of Russia, Balashikha, Moscow Region, Russian Federation; ORCID: 0000-0002-5849-6956; e-mail: vniipo@mail.ru

Vladimir I. LOGINOV, Dr. Sci. (Eng.), Senior Researcher, Chief Researcher of Research Center of Fire Rescue Technique and Robotics, All-Russian Research Institute for Fire Protection of Emercom of Russia, Balashikha, Moscow Region, Russian Federation; ORCID: 0000-0003-1418-8780; e-mail: vniipo_robot@mail.ru

Yuri N. OSIPOV, Cand. Sci. (Military), Professor, Leading Researcher of Research Center of Fire Rescue Technique and Robotics, All-Russian Research Institute for Fire Protection of Emercom of Russia, Balashikha, Moscow Region, Russian Federation; ORCID: 0000-0002-6668-1844;
 e-mail: vniipo_robot@mail.ru

Vladimir I. ERSHOV, Cand. Sci. (Military), Associate Professor, Senior Researcher of Research Center of Fire Rescue Technique and Robotics, All-Russian Research Institute for Fire Protection of Emercom of Russia, Balashikha, Moscow Region, Russian Federation; ORCID: 0000-0001-9064-2805; e-mail: vniipo_robot@mail.ru

Elena D. MIKHAYLOVA, Cand. Sci. (Eng.), Leading Researcher of Research Center for Regulatory and Technical Problems of Fire Safety, All-Russian Research Institute for Fire Protection of Emercom of Russia, Balashikha, Moscow Region, Russian Federation; ORCID: 0000-0002-5847-9590;
 e-mail: chaika-med@yandex.ru

УДК 614.841/614.838

Новая классификация взрывоопасных зон

© А. С. Харламенков ✉

Академия ГПС МЧС России (Россия, 129366, г. Москва, ул. Бориса Галушкина, 4)

АННОТАЦИЯ

Рассмотрены требования нормативных документов по классификации взрывоопасных зон. Проведен сравнительный анализ классов по существующим нормам. Представлена новая классификация взрывоопасных зон и даны пояснения по местам их возникновения. Отмечены особенности в определении геометрических размеров зон. Выполнено сопоставление категорий пожаровзрывоопасности помещений с классами взрывоопасных зон.

Ключевые слова: взрывоопасные смеси; категории помещений; взрывозащищенное оборудование; пожарная безопасность; электроустановки.

Для цитирования: Харламенков А. С. Новая классификация взрывоопасных зон // Пожаровзрывобезопасность/Fire and Explosion Safety. — 2019. — Т. 28, № 4. — С. 92–94.

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

New classification of hazardous areas

© Aleksandr S. Kharlamenkov ✉

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

ABSTRACT

Regulatory requirements on the classification of hazardous areas are considered. Comparative analysis of classes according to existing standards is conducted. New classification of hazardous areas is presented and explanations to the places of their occurrence are presented. Features in determining the geometric dimensions of zones are marked. Comparison of categories of fire-explosion of premises with classes of hazard zones is made.

Keywords: explosive mixtures; categories of premises; explosion-proof equipment; fire safety; electrical installations.

For citation: A. S. Kharlamenkov. New classification of hazardous areas. *Pozharovzryvobezopasnost/Fire and Explosion Safety*, 2019, vol. 28, no. 4, pp. 92–94 (in Russian).

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



ВОПРОС:

С вступлением в 2009 г. Технического регламента о требованиях пожарной безопасности в законную силу существующая классификация взрывоопасных зон претерпела значительные изменения. В результате требования Правил устройства электроустановок (ПУЭ) по выбору, эксплуатации и обслуживанию электрооборудования во взрывоопасных средах перестали действовать, а новых “правил” при этом не появилось.

В каких нормативных документах изложен порядок выбора и применения электрооборудования с учетом действующей классификации взрывоопасных зон?

ОТВЕТ:

В ст. 19 Федерального закона № 123-ФЗ “Технический регламент о требованиях пожарной безопасности” [1] (далее — ФЗ-123) представлена классификация взрывоопасных зон, которые разделяются на классы 0, 1, 2 для мест с обращением горючих газов и паров ЛВЖ и 20, 21, 22 — горючих летучих

частиц и пыли. За основу данной в ФЗ-123 [1] классификации были приняты обозначения зон, представленные в международных стандартах серии IEC 60079. Их модифицированные версии действуют на территории Российской Федерации как серия ГОСТ 30852, а именно ГОСТ 30852.0–2002 [2].

Как показывает практика, с 2009 г. при оценке классов взрывоопасных зон промышленных зданий и сооружений по ФЗ-123 [1] и ГОСТ 30852.0–2002 [2] у проектировщиков возникало множество сложностей и проблемных вопросов. Это было вызвано тем, что существующая ранее классификация взрывоопасных зон по ПУЭ [3] значительно отличается от представленной в ФЗ-123 [1]. Различия в классификации взрывоопасных зон по ПУЭ [3], ФЗ-123 [1] и ГОСТ 30852.0–2002 [2] подробно рассмотрены в статье [4].

Для решения этой проблемы были предприняты определенные шаги, позволившие опубликовать новый свод правил — СП 423.1325800.2018 “Электроустановки низковольтные зданий и сооружений. Пра-

вила проектирования во взрывоопасных зонах” [5], который вступил в силу 25 июня 2019 г. (далее — СП 423).

В п. 5.1 СП 423 [5] представлена “адаптированная” под ФЗ-123 [1] (с учетом ПУЭ [3]) классификация взрывоопасных зон, которая включает в себя аналогичные классы 0, 1, 2 и 20, 21, 22. Зоны разделены на подзоны, которым соответствуют подклассы 1а, 1б, 1г и др. Разделение зон на подзоны в СП 423 [5] носит рекомендательный характер. Перечень существующих классов зон представлен в таблице.

Условное сопоставление классов взрывоопасных зон по существующим нормам

Классы взрывоопасных зон по нормам			
ФЗ-123 [1] ¹	ГОСТ 30852.0–2002 [2] ¹	СП 423.1325800.2018 [5]	ПУЭ [3]
0	0	0	–
1	1	1а ² 1г ³	B-I ² B-Iг ³
2	2	2а ² 2б ² 2г ³	B-Iа ² B-Iб ² B-Iг ³
20	20	20а ⁴ 20б ⁵ 20в ⁶	–
21	21	21а 21б 21в	B-II ²
22	22	22а 22б 22в	B-IIа ²

¹ Между классами зон по ФЗ-123 [1] и ГОСТ 30852.0–2002 [2] имеются различия (см. статью [5]).

² Зоны, образование которых возможно только в помещениях.

³ Зоны, образование которых возможно только на открытом пространстве (вне помещений).

⁴ Классы 20а, 21а, 22а присваиваются зонам с наличием воздушной взвеси частиц горючей металлической пыли либо пыли с подобными характеристиками (электропроводящие пыли).

⁵ Классы 20б, 21б, 22б присваиваются зонам с наличием пылевоздушной смеси из частиц сажи, древесного угля, кокса либо смесей с подобными характеристиками (непроводящие пыли).

⁶ Классы 20в, 21в, 22в присваиваются зонам с наличием воздушной взвеси твердых частиц зерновой пыли, вискозы, хлопка (в том числе хлопкового пуха и отходов хлопка), сизаля, джута, конопли, какао-волокна, пакли либо пыли с подобными характеристиками (горючие летучие частицы).

Из таблицы видно, что разработчики СП 423 [5], используя разделение зон на подзоны, смогли учесть особенности классификации, представленные ранее в ПУЭ [3]. Тем не менее важный вопрос по оценке геометрических размеров взрывоопасных зон остался нерешенным.

Следует отметить, что разделение пылей на электропроводящие и непроводящие в СП 423 [5] основано на величине удельного электрического сопротивления. Пыли относятся к электропроводящим, если их электрическое сопротивление $\rho \leq 10^3$ Ом·м, к непроводящим — если $\rho > 10^3$ Ом·м.

Взрывоопасная зона по п. 5.1.2 СП 423 [5] равна геометрическим размерам помещения, если в нем могут образоваться взрывоопасные газопаровоздушные или пылевоздушные смеси, при воспламенении которых развивается расчетное избыточное давление взрыва ΔP , превышающее 5 кПа. В противном случае размер зоны принимается в пределах 5 м по горизонтали и вертикали от технологического аппарата, содержащего горючие газы, ЛВЖ или пыли.

Ранее в требованиях ПУЭ [3] вместо величины $\Delta P = 5$ кПа указывалось процентное отношение объема взрывоопасной смеси к свободному объему помещения, равное 5 %. Этот подход являлся более рациональным, так как позволял проектировщикам определить оптимальное количество взрывозащищенного оборудования (далее — Ех-оборудование) в зависимости от границ взрывоопасной зоны. Это, в свою очередь, позволяло выполнить экономическое обоснование предлагаемых технических решений и, что самое главное, снизить до минимума вероятность возникновения взрыва от запроектированного Ех-оборудования. Следовательно, совершенно нелогично оценивать размеры взрывоопасных зон по СП 423 [5] для ситуаций с воспламенением смеси, которых в принципе не должно возникать во взрывоопасных средах как при нормальных режимах работы технологического оборудования (зоны классов 1 или 21), так и при аварийных ситуациях и неисправностях с кратковременным присутствием взрывоопасных смесей (зоны классов 2 и 22).

Оценка избыточного давления взрыва ΔP необходима для определения категории помещения по пожаро- и взрывоопасности, в том числе при анализе опасности поражения человека возникающей при взрыве ударной волной. Указанное в СП 423 [5] значение $\Delta P = 5$ кПа позволяет связать между собой категории помещений и классы взрывоопасных зон. Так, в помещениях категорий А и Б могут присутствовать взрывоопасные зоны классов 1, 21 и 2, 22, которые всегда будут занимать весь свободный объем помещения. Для категорий В1–В4 эти же зоны всегда будут ограничены областью размером 5 м по горизонтали и вертикали. Такое сопоставление отчасти позволяет установить связь между категорированием и зониро-

ванием помещений. Различие целей, которые ставятся при классификации взрывоопасных зон и категорировании взрывопожароопасных помещений, не дает сделать однозначный вывод об опасности их внутреннего пространства, а также определить критерий безопасности рабочего персонала производственных помещений [6].

В п. 5.1.1 СП 423 [5] также указано, что размеры взрывоопасных зон следует определять по методикам, представленным в ГОСТ IEC 60079-10-1 (аналог ГОСТ 30852.9–2002 [7]) и ГОСТ IEC 60079-10-2 (аналог ГОСТ 31610.10-2–2017 [8]). Данные методики учитывают множество факторов, влияющих на распространение взрывоопасной смеси как внутри, так и за пределами помещения. Кроме этого, в п. 5.1.6 СП 423 [5] для наружных установок даны конкретные размеры взрывоопасных зон (0,5; 3; 5; 8 и 20 м), позаимствованные из ПУЭ [3], которые отличаются [9] от расчетных значений стандартов [7, 8].

Таким образом, существующая проблема сопоставления классов взрывоопасных зон по действующим нормативным документам частично решена, но требования нового СП 423 [5] не дают однозначного ответа на вопрос по введению единой методики расчета размеров зон.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Технический регламент о требованиях пожарной безопасности (в ред. от 27.12.2018) : Федер. закон РФ от 22.07.2008 № 123-ФЗ; принят Гос. Думой 04.07.2008; одобр. Сов. Федерации 11.07.2008 // Собр. законодательства РФ. — 2008. — № 30 (ч. I), ст. 3579.
2. ГОСТ 30852.0–2002 (МЭК 60079-0:1998). Электрооборудование взрывозащищенное. Часть 0. Общие тре-

бования. — Введ. 15.02.2014. — М. : Стандартинформ, 2014.

3. Правила устройства электроустановок (ПУЭ). — 6-е изд. — М. : Энергоатомиздат, 1986.

4. Харламенков А. С. Гармонизация национальных и международных стандартов в области обеспечения пожаровзрывобезопасности объектов // Пожаровзрывобезопасность / Fire and Explosion Safety. — 2014. — Т. 23, № 12. — С. 5–12.

5. СП 423.1325800.2018. Электроустановки низковольтные зданий и сооружений. Правила проектирования во взрывоопасных зонах. — Введ. 25.06.2019. — М. : Минстрой России, 2019.

6. Батманов С. В., Кобелев А. А. Нормативные требования к классификации взрывоопасных зон и взрывопожароопасных категорий при проектировании производственных помещений // Пожаровзрывобезопасность / Fire and Explosion Safety. — 2014. — Т. 23, № 5. — С. 6–9.

7. ГОСТ 30852.9–2002 (МЭК 60079-10:1995). Электрооборудование взрывозащищенное. Часть 10. Классификация взрывоопасных зон. — Введ. 15.02.2014. — М. : Стандартинформ, 2014.

8. ГОСТ 31610.10-2–2017/IEC 60079-10-2:2015. Взрывоопасные среды. Часть 10-2. Классификация зон. Взрывоопасные пылевые среды. — Введ. 01.06.2019. — М. : Стандартинформ, 2018.

9. Харламенков А. С., Елестратова Ю. О., Марков А. Г. Сравнительный анализ размеров взрывоопасных зон, рассчитанных по методикам национальных и международных стандартов // Проблемы техносферной безопасности-2019 : материалы VIII Международной научно-практической конференции молодых ученых и специалистов. — М. : Академия ГПС МЧС России. — 2019. — С. 184–188.

*Материал поступил в редакцию 08.07.2019
Received 8 July 2019*

Информация об авторе

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

Information about the author

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

ПРАВИЛА ДЛЯ АВТОРОВ!

Направляемые в журнал “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: подписанной подписи и всех текстовых надписей на самом рисунке;
- для схемы: подписи к ней и всего содержания самой схемы.

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

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

В описании источников необходимо указывать всех авторов.

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

Список литературы должен содержать не менее 20 источников (в это число не входят нормативные документы, патенты, ссылки на сайты компаний и т. п.). При этом количество ссылок на статьи из иностранных научных журналов и другие иностранные источники должно быть не менее 40 % от общего количества ссылок. Не более половины от оставшихся 60 % должны составлять статьи из русскоязычных научных журналов, остальное — другие первоисточники на русском языке.

Не менее половины источников должно быть включено в один из ведущих индексов цитирования: Российский индекс научного цитирования eLibrary, Web of Science, Scopus, Chemical Abstracts, MathSciNet, Springer и др. В случае присвоения публикациям цифрового идентификатора объекта (DOI) его необходимо указать, что позволит однозначно идентифицировать объект в базах данных.

Состав источников должен быть актуальным и содержать не менее половины современных (не старше 10 лет) статей из научных журналов или других публикаций.

В списке литературы должно быть не более 30 % источников, автором либо соавтором которых является автор статьи.

Следует обратить внимание на публикации диссертаций (особенно докторских), защищенных в последние годы по ближайшей научной специальности или группе специальностей. Для поиска рекомендуется использовать ресурс <http://www.disscat.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, предоставившие рукопись для публикации в журнале “Пожаровзрывобезопасность / Fire and Explosion Safety”, согласны с условиями публикации или отклонения рукописи, а также с правилами ее оформления!

БЕЗОПАСНОСТЬ КРЫМ 2019

V ВЫСТАВКА
КОМПЛЕКСНОЙ
БЕЗОПАСНОСТИ

14-16 НОЯБРЯ



РЕКЛАМА

📍 Место проведения: Ялта. Отель «Ялта-Интурист»

🌐 exprocrimea.com ☎ + 7 (978) 900 90 90



ЭКСПОКРЫМ
группа компаний



ИНСТИТУТ КОМПЛЕКСНОЙ БЕЗОПАСНОСТИ В СТРОИТЕЛЬСТВЕ

Национальный исследовательский
Московский государственный
строительный университет

Научно-
исследовательские
и сертификационные
испытания:

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

Контакты:

Тел.: 8 (495) 109-05-58

e-mail: ikbs@mgsu.ru,

mail@ikbs-mgsu.com

www.ikbs-mgsu.com

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