

3-2019

FIRE and EXPLOSION
SAFETY

ПОЖАРОВЗРЫВО-

БЕЗОПАСНОСТЬ



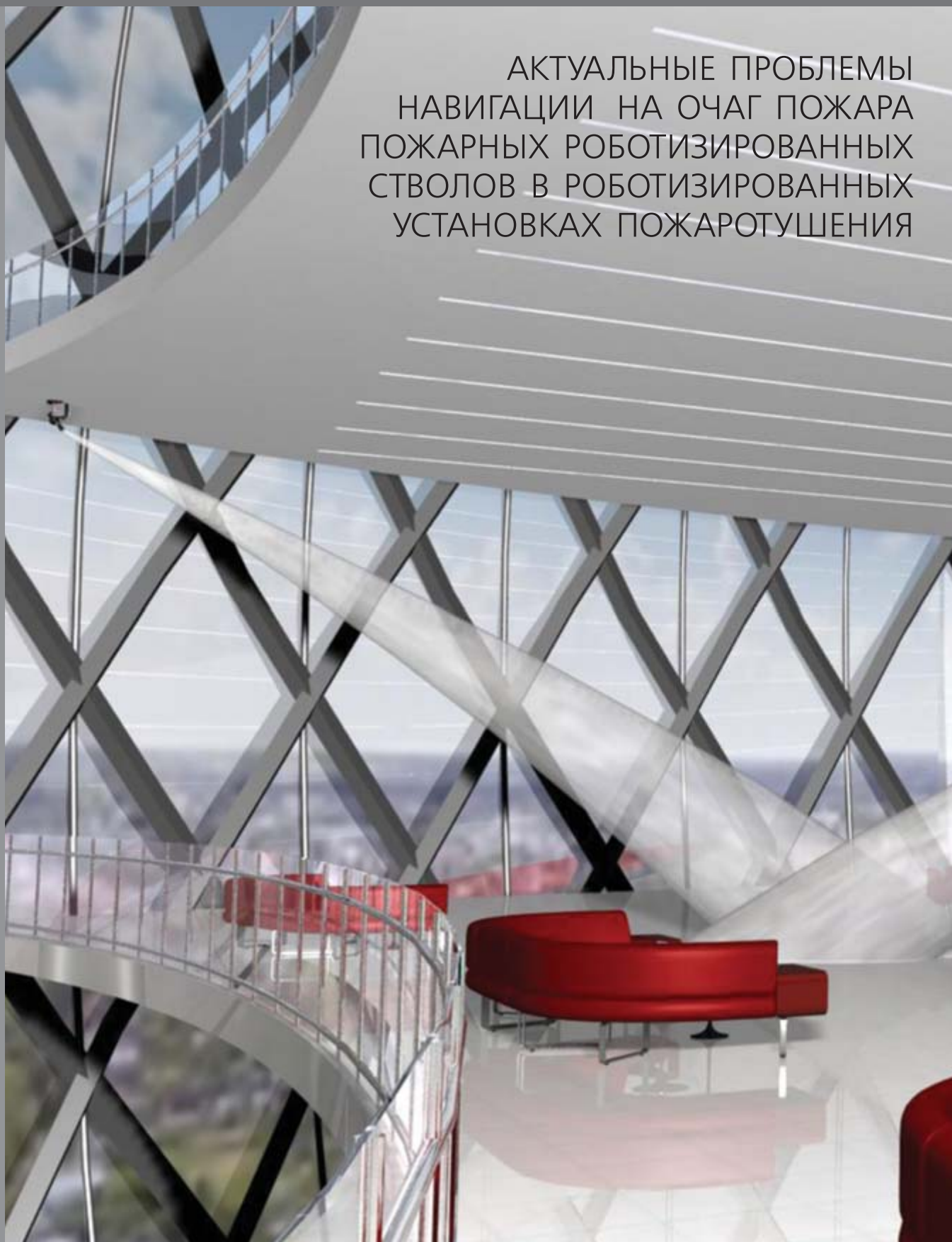
НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКИЙ ЖУРНАЛ

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

КОМПЛЕКСНАЯ БЕЗОПАСНОСТЬ

пожарная • промышленная • производственная • экологическая

АКТУАЛЬНЫЕ ПРОБЛЕМЫ
НАВИГАЦИИ НА ОЧАГ ПОЖАРА
ПОЖАРНЫХ РОБОТИЗИРОВАННЫХ
СТВОЛОВ В РОБОТИЗИРОВАННЫХ
УСТАНОВКАХ ПОЖАРОТУШЕНИЯ





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

В 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



№3 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 14.06.2019.

Выход в свет 25.06.2019.

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

ОБЩИЕ ВОПРОСЫ КОМПЛЕКСНОЙ БЕЗОПАСНОСТИ

Н. В. КАМЕНЕЦКАЯ, О. М. МЕДВЕДЕВА,
С. Б. ХИТОВ, М. В. СИЛЬНИКОВ
Методика обоснования резерва запасных частей
для работы специальной техники в ходе ликвидации
чрезвычайной ситуации

6

ПРОЦЕССЫ ГОРЕНИЯ, ДЕТОНАЦИИ И ВЗРЫВА

Ю. Х. ПОЛАНДОВ, С. А. ДОБРИКОВ
Влияние на развитие газового взрыва в помещении
расстояния между местом воспламенения и окном

14

МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ, ЧИСЛЕННЫЕ МЕТОДЫ И КОМПЛЕКСЫ ПРОГРАММ

В. Я. ВИЛИСОВ
Моделирование уровня риска решений, принимаемых
при управлении ликвидацией пожаров

36

Н. Г. ТОПОЛЬСКИЙ, И. В. САМАРИН,
А. Ю. СТРОГОНОВ, КИЕУ ТУАН АНЬ
Модель оценки влияния мероприятий пожарной
безопасности на агрегатную цель для цифровых
двойников объектов ТЭК

50

М. В. АЛЕШКОВ, В. А. БАСОВ, А. А. КОЛБАСИН,
А. А. ТАРАНЦЕВ, А. Л. ХОЛОСТОВ
Моделирование сети связи для управления действиями
пожарных подразделений при тушении пожаров
различной сложности

59

АВТОМАТИЗИРОВАННЫЕ СИСТЕМЫ И СРЕДСТВА

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 1. Предпосылки создания РУП и специфические
особенности тушения пожаров ПРС

70

ЭКОНОМИКА И УПРАВЛЕНИЕ ПОЖАРНОЙ И КОМПЛЕКСНОЙ БЕЗОПАСНОСТЬЮ

Н. Г. ТОПОЛЬСКИЙ, Д. В. ТАРАКАНОВ,
К. А. МИХАЙЛОВ, А. В. МОКШАНЦЕВ
Совершенствование информационного обеспечения
групп разведки пожара при его мониторинге в здании
с использованием инфракрасных технологий

89

ВОПРОС – ОТВЕТ

Л. М. МЕШМАН
Частные вопросы по проектированию внутреннего
противопожарного водопровода

98

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

CONTENTS

GENERAL QUESTIONS OF COMPLEX SAFETY

N. V. KAMENETSKAYA, O. M. MEDVEDEVA,
S. B. KHITOV, M. V. SILNIKOV
Methodology for justifying of the spare parts reserve
for the work of special technical means in the course
of emergency response

COMBUSTION, DETONATION AND EXPLOSION PROCESSES

Iu. Kh. POLANDOV, S. A. DOBRIKOV
Effect of distance between ignition location and window
on indoor gas explosion development

MATHEMATICAL MODELING, NUMERICAL METHODS AND PROGRAM COMPLEXES

V. Ya. VILISOV
Modeling the level of risk of decisions accepted
at management fire elimination

N. G. TOPOLSKIY, I. V. SAMARIN,
A. Yu. STROGONOV, KIEU TUAN ANH
Model of an assessment of impact of fire safety measures
on the aggregate target for the digital twins of fuel
and energy complex facilities

M. V. ALESHKOV, V. A. BASOV, A. A. KOLBASIN,
A. A. TARANTSEV, A. L. KHOLOSTOV
Modeling the communication network to control
the action fire units to extinguish fires of various
complexity

AUTOMATED SYSTEMS AND MEANS

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 1. Background to the development of RFSS
and specific characteristics of the fire fighting
by means of RFM

ECONOMICS AND FIRE AND COMPLEX SAFETY CONTROL

N. G. TOPOLSKIY, D. V. TARAKANOV,
K. A. MIKHAYLOV, A. V. MOKSHANTSEV
Improvement of information support fire intelligence
groups at fire building monitoring using
infrared technology

QUESTION – ANSWER

L. M. MESHMAN
Special issues on design installation of standpipe and hose
systems

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.



Обоснования резерва запасных частей для специальной техники

Стр. 6



Стр. 14

Влияние на развитие газового взрыва в помещении положения окна



Моделирование уровня риска решений, принимаемых РТП

Стр. 36



Стр. 50

Модель оценки влияния мероприятий ПБ на агрегатную цель

Стр. 70



Предпосылки создания РУП и особенности тушения пожаров ПРС



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 14.06.2019.

Date of publication 25.06.2019.

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)



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

<https://doi.org/10.18322/PVB.2019.28.03.6-13>

УДК 614.849

Методика обоснования резерва запасных частей для работы специальной техники в ходе ликвидации чрезвычайной ситуации

© Н. В. Каменецкая¹, О. М. Медведева¹, С. Б. Хитов^{2✉}, М. В. Сильников¹

¹ Санкт-Петербургский университет ГПС МЧС России (Россия, 196105, г. Санкт-Петербург, Московский просп., 149)

² Западный военный округ Министерства обороны Российской Федерации (Россия, 191055, г. Санкт-Петербург, Дворцовая пл., 10)

РЕЗЮМЕ

Введение. Создание резервов материальных ресурсов для ликвидации последствий чрезвычайных ситуаций (ЧС) природного и техногенного характера является одной из основных задач единой государственной системы предупреждения и ликвидации чрезвычайных ситуаций. Достаточный объем материальных ресурсов, их рациональное размещение, правильное хранение и качественное обслуживание обеспечивают возможность оперативного устранения непосредственной опасности для жизни и здоровья людей, организации первоочередного жизнеобеспечения населения в зоне бедствия.

Цели и задачи. Возникает актуальная проблема предварительной оценки, учета и обоснования резерва запасных частей для работы специальной техники пожарно-спасательных подразделений в ходе ликвидации ЧС, исходя из принципа необходимой достаточности и максимально возможного использования имеющихся сил и средств.

Методы. Для планирования необходимого количества запасных частей специальной техники с учетом их стоимости, а также для обоснования решения об оптимальном числе ремонтных бригад, способных обеспечить своевременную замену вышедших из строя агрегатов в условиях ЧС или при ликвидации ее последствий, применимы методы теории очередей и систем массового обслуживания.

Результаты и их обсуждение. В статье предложена методика расчета оптимального резерва запасных частей для обеспечения нормальной работы специальной техники с экономическим обоснованием, учитывающим материальные затраты на их приобретение и на содержание ремонтных бригад. Приведены расчеты, которые позволяют на практике предварительно учитывать риски, связанные с недостаточным резервом запасных частей и с вынужденными простоями специальной техники из-за отсутствия возможности быстро устранить неисправности в ходе ликвидации ЧС и проведения аварийно-спасательных работ. Выработаны практические рекомендации по определению экономически целесообразного количества запасных частей и числа операторов, производящих ремонт специальной техники, с учетом материальных затрат и показателей надежности.

Заключение. Проблематика статьи отвечает современным направлениям научного обеспечения оперативной деятельности МЧС России и обусловлена наличием широкого круга задач, связанных с вопросами создания, хранения, использования и восполнения резервов материальных ресурсов в ходе ликвидации ЧС природного и техногенного характера.

Ключевые слова: оценка надежности; материальные ресурсы; простои специальной техники; оптимальное число ремонтных бригад; теория очередей; системы массового обслуживания;

Для цитирования: Каменецкая Н. В., Медведева О. М., Хитов С. Б., Сильников М. В. Методика обоснования резерва запасных частей для работы специальной техники в ходе ликвидации чрезвычайной ситуации // Пожаровзрывобезопасность/Fire and Explosion Safety. — 2019. — Т. 28, № 3. — С. 6–13. DOI: 10.18322/PVB.2019.28.03.6-13.

✉ Хитов Сергей Борисович, e-mail: khitoff_s@mail.ru

Methodology for justifying of the spare parts reserve for the work of special technical means in the course of emergency response

© Nataliya V. Kamenetskaya¹, Olga M. Medvedeva¹, Sergey B. Khitov^{2✉}, Mikhail V. Silnikov¹

¹ Saint Petersburg University of State Fire Service of Emercom of Russia (Moskovskiy Avenue, 149, Saint Petersburg, 196105, Russian Federation)

² Western Military District of the Ministry of Defense of the Russian Federation (Dvortsovaya Square, 10, Saint Petersburg, 191055, Russian Federation)

ABSTRACT

Introduction. The creation of material resources reserves for the elimination of consequences of natural disasters and technogenic accidents (emergency situations — ES) is one of the main tasks of United State system of prevention and response to emergency situations. A sufficient amount of material resources, their rational placement, proper storage and quality service ensures the ability quickly to liquidate the immediate danger to human life and health, the organization of paramount life support for the population in the disaster area.

Aims and purposes. There is an actual problem of preliminary assessment, accounting and justification of the spare parts reserve for work special technical means (STM) of the firefighting and rescue service in the course of emergency response, based on the principle of the necessary sufficiency and the maximum possible use of the available forces and means.

Methods. For the planning the required amount of spare parts for STM, taking into account their cost, as well as for substantiating the decision on the optimal number of repair teams capable of ensuring timely replacement of failed units in an ES or its consequences, the methods of queuing theory and queuing systems are applicable.

Results and discussion. The article proposes a method of calculating the optimal reserve of spare parts to ensure the normal operation of STM with economic justification, taking into account the material costs of their acquisition and maintenance of repair teams. There are presented the calculations that allow in practice to take into account the risks associated with insufficient reserve of spare parts and forced downtime of STM due to the inability to quickly troubleshoot during ES response and rescue operations. Practical recommendations for determination of economically expedient quantity of spare parts and number of the operators making repair of special equipment taking into account material costs and indicators of reliability are developed.

Conclusions. The problems of the article correspond to the modern directions of scientific support of operational activities of Emercom of Russia and due to the presence of a wide range of tasks related to the creation, storage, use and replenishment of reserves of material resources during the liquidation of consequences of natural disasters and technogenic accidents.

Keywords: reliability assessment; material resources; downtime of special technical means; optimal number of repair teams; queuing theory; queuing systems.

For citation: N. V. Kamenetskaya, O. M. Medvedeva, S. B. Khitov, M. V. Silnikov. Methodology for justifying of the spare parts reserve for the work of special technical means in the course of emergency response. *Pozharovzryvobezopasnost/Fire and Explosion Safety*, 2019, vol. 28, no. 3, pp. 6–13 (in Russian). DOI: 10.18322/PVB.2019.28.03.6-13.

✉ *Sergey Borisovich Khitov*, e-mail: khitoff_s@mail.ru

Введение

Создание резервов материальных ресурсов для ликвидации последствий чрезвычайных ситуаций (ЧС) природного и техногенного характера является одной из основных задач единой государственной системы предупреждения и ликвидации чрезвычайных ситуаций (РСЧС). Деятельность этой системы направлена на повышение эффективности действий пожарно-спасательных подразделений в зонах стихийных бедствий или техногенных аварий, на формирование комплекса мероприятий по снижению рисков возникновения ЧС и уменьшению тяжести их последствий [1].

Достаточный объем материальных ресурсов, их рациональное размещение, правильное хранение и качественное обслуживание обеспечивают возможность оперативного устранения непосредственной опасности для жизни и здоровья людей, организации первоочередного жизнеобеспечения населения в зоне бедствия.

Нельзя не учитывать, что в крайне сложной обстановке чрезвычайной ситуации и в ходе устранения ее последствий с применением различных видов специальной техники (СТ) существенно возрастает вероятность отказов в ее работе из-за выхода из строя отдельных функциональных частей. Это обусловлено повышенной нагрузкой на эту технику при

проведении аварийно-спасательных работ (АСР), необходимостью ее транспортировки в зону бедствия, неблагоприятными условиями эксплуатации.

Цели и задачи исследования

В связи с вышесказанным возникает актуальная проблема обоснования резерва запасных частей, требуемого для обеспечения бесперебойной работы специальной техники пожарно-спасательных подразделений (далее — ПСП) в ходе ликвидации ЧС, исходя из принципа необходимой достаточности и максимально возможного использования имеющихся сил и средств [2].

Недостаток запасных частей вызывает вынужденные простои СТ, в то же время чрезмерное количество запасных частей нерационально с финансовой точки зрения. Обоснование оптимального запаса жизненно важных деталей машин требует серьезного экономического подхода. При решении сформулированной задачи нужно учитывать статистику выхода из строя СТ в процессе ее эксплуатации, уровень подготовки обслуживающего технического персонала, возможности по восстановлению вышедших из строя деталей, узлов, блоков, а также экономические показатели, учитывающие материальные затраты на содержание СТ.

Резерв запасных частей для специальной техники ПСП должен быть таким, чтобы она работала эффективно и без простоев, и финансирование ее обслуживания было экономически обосновано [3].

Поставленная задача является оптимизационной, а значит, решаемой с помощью известных математических методов (методов исследования операций). Применение математического моделирования для прогнозирования различных вариантов развития событий в сложных условиях ликвидации последствий ЧС позволяет обеспечить высокую эффективность формирования оптимальных управленческих решений, что подтверждается многолетним отечественным и зарубежным опытом [4–19].

Для планирования необходимого количества запасных частей специальной техники с учетом их стоимости, а также для обоснования решения по оптимальному числу ремонтных бригад, способных обеспечить своевременную замену вышедших из строя агрегатов в условиях ЧС или при ликвидации ее последствий, применимы методы теории массового обслуживания [9, 10, 18, 19].

В частности, нормальное функционирование специальной техники ПСП МЧС России, обеспеченное наличием необходимого запаса технических средств и достаточного количества обслуживающего персонала (бригад механиков), в определенных условиях можно рассматривать как систему массового обслуживания (СМО).

Рассмотрим СМО, в которой допускается обслуживание с резервом, т. е. с запасными частями, группы однотипных машин (специальной техники). Назовем функциональные части машин, которые могут выходить из строя во время работы, агрегатами, а способ их ремонта и восстановления в работе — агрегатным.

Постановка задачи

Пусть имеется m однотипных машин (СТ). В процессе работы агрегаты, приводящие их в движение, могут выходить из строя случайным образом с постоянной плотностью λ . Время выхода из строя распределено по показательному закону со средним значением t_n . Для замены пришедших в негодность агрегатов имеется n запасных. Как только агрегат отказывает, во избежание простоев техники его сразу заменяют исправным запасным, если таковой имеется. Неисправный агрегат поступает в пункт ремонта, который обслуживают c операторов. Время восстановления каждого агрегата определяется характером неисправности, опытом оператора и другими факторами и может рассматриваться как случайная величина. Время ремонта неисправных агрегатов распределено по показательному закону со средним значением $t_{\text{обс}}$ и параметром μ (где μ — интенсивность потока обслуживания заявок).

Введем ограничения. Будем считать входящий поток объектов в исследуемой СМО простейшим [20], т. е. обладающим следующим свойством: результатом сложения большого числа ординарных стационарных потоков с различными последствиями является поток объектов, сколь угодно близкий к простейшему [21].

В указанных условиях необходимо определить основные характеристики СМО с учетом выхода из строя агрегатов и их восстановления с использованием имеющихся в наличии исправных запасных частей. По результатам расчетов следует выработать рекомендации по улучшению этих характеристик для повышения эффективности и надежности работы системы в целом, т. е. принять меры, направленные на устранение или корректировку возможных рисков, обусловленных недостаточным количеством запасных частей [1–6].

Методы исследования

Для решения сформулированной задачи воспользуемся рядом известных формул [22, 23].

В рассматриваемых условиях возможны следующие состояния СМО с отказами:

S_0 — все запасные агрегаты исправны и все машины работают;

S_k — k запасных агрегатов ($1 \leq k \leq n$) неисправны и либо ремонтируются все, либо часть ремонтируется, а часть ожидает ремонта;

S_{n+s} — n запасных агрегатов неисправны и s машин не работают ($1 \leq s \leq m$).

Обозначим вероятности этих состояний в момент времени t соответственно через $p_0(t)$, $p_k(t)$, $p_{n+s}(t)$. Получим следующую систему дифференциальных уравнений:

$$\begin{cases} p'_0(t) = -\lambda p_0(t) + \mu p_1(t); \\ p'_k(t) = -(\lambda + k\mu) p_k(t) + \lambda p_{k-1}(t) + (k+1)\mu p_{k+1}(t) \text{ при } 0 < k \leq c; \\ p'_k(t) = -(\lambda + c\mu) p_k(t) + \lambda p_{k-1}(t) + c\mu p_{k+1}(t) \text{ при } c < k < n+1; \\ p'_{n+s}(t) = -(\lambda + c\mu) p_{n+s}(t) + \lambda p_{n+s-1}(t) + c\mu p_{n+s+1}(t) \text{ при } 1 \leq s \leq m; \\ p'_{n+m}(t) = -c\mu p_{n+m}(t) + \lambda p_{n+m-1}(t), \end{cases} \quad (1)$$

где $p_{n+m}(t)$ — вероятность отказа в обслуживании, когда специальная техника простаивает из-за отсутствия запасных частей. Эта вероятность в данной постановке задачи является риском, который необходимо минимизировать [1–6].

Введем обозначение $\lambda/\mu = \alpha$. Тогда с учетом нормирующего условия

$$\sum_{k=0}^{n+m} p_k(t) = 1$$

получим для стационарного режима следующие решения:

- 1) вероятность того, что все агрегаты исправны и все машины работают:

$$P_0 = \left[1 + \sum_{k=1}^c \frac{\alpha^k}{k!} + \frac{\alpha^c}{c!} \sum_{k=1}^{n-c+1} \left(\frac{\alpha}{c} \right)^k + \left(\frac{\alpha}{c} \right)^{n-c} \frac{\alpha^c}{c!} \sum_{k=2}^m (\alpha)^k \right]^{-1}; \quad (2)$$

- 2) вероятность того, что вышли из строя k агрегатов (или s машин, $1 \leq s \leq m$):

$$P_k = \frac{\alpha^k}{k!} P_0 \quad \text{при } k \leq c; \quad (3)$$

$$P_k = \left(\frac{\alpha}{c} \right)^{k-c} \frac{\alpha^c}{c!} P_0 \quad (4)$$

при $c < k < n+1$, $n+1 \leq k \leq m+n$;

- 3) среднее число неисправных машин, ожидающих ремонта:

$$N_0 = \sum_{k=1}^m k P_{k+n}; \quad (5)$$

- 4) коэффициент простоя машин:

$$K_0 = N_0 / m; \quad (6)$$

- 5) среднее число неисправных агрегатов:

$$N_p = \sum_{k=1}^{n+m} k P_k. \quad (7)$$

Рассмотренная математическая модель решаемой задачи является замкнутой СМО с очередью длиной N_0 (средним числом неисправных машин, ожидающих ремонта). Характеристики такой СМО можно улучшать, меняя значения параметров n , c , $t_{\text{обс}}$, добиваясь как можно меньшего значения $P_{\text{отк}} = P_{n+m}$.

Пример оценки надежности работы группы однотипных машин (специальной техники) с возможностью применения запасных частей

Для повышения надежности работы группы пожарно-спасательной техники в зоне ликвидации ЧС, состоящей из четырех однотипных машин ($m = 4$), имеются в наличии две запасные части ($n = 2$). Это могут быть двигатели, колеса или другие важные детали СТ. Во время проведения АСР эти функциональные части машин (агрегаты) могут выходить из строя и находиться некоторое время в ремонте. Чтобы по этой причине не возникали простои техники, вышедшие из строя агрегаты мгновенно заменяются исправными запасными частями, если они есть. В противном случае специальная техника бездействует. Предположим, что среднее время наработки агрегата на один отказ в сложных условиях ЧС

$\bar{t}_n = 100$ ч. Ремонт производится одной бригадой ($c = 1$). Среднее время восстановления одного агрегата $t_{\text{обс}} = 10$ ч.

От того, сколько времени в среднем специальная техника будет простаивать, зависят показатели надежности и эффективности ее работы.

Положим, что показатель надежности ΔH (%) пропорционален числу работающих машин и выражается зависимостью

$$\Delta H = \frac{m - N_0}{m} \cdot 100,$$

где N_0 — среднее число машин, простаивающих из-за отсутствия исправных запасных агрегатов;

m — общее число машин.

Оценим показатели надежности и эффективности работы группы машин (специальной техники) в рамках приведенного примера, используя формулы (1)–(7).

Средняя плотность потока неисправностей $\lambda = 4 \cdot \frac{1}{100} = 0,04$. Тогда $\alpha = 0,04 \cdot 10 = 0,4$.

По формуле (2) определим P_0 :

$$P_0 = [1 + 0,4 + 0,4 (0,4 + 0,16) + 0,4 \cdot 0,4 (0,16 + 0,064 + 0,0256)]^{-1} \approx 0,601.$$

По формуле (3) вычислим P_1 , по формуле (4) — P_2 :

$$P_1 = 0,4 \cdot 0,601 \approx 0,2404;$$

$$P_2 = 0,4 \cdot 0,4 \cdot 0,601 \approx 0,0962.$$

Величину N_0 рассчитаем по формуле (5), предварительно определив вероятности P_3, P_4, P_5 и P_6 по формуле (4):

$$P_3 = (0,4)^2 \cdot 0,4 \cdot 0,601 \approx 0,0385;$$

$$P_4 = (0,4)^3 \cdot 0,4 \cdot 0,601 \approx 0,0154;$$

$$P_5 = (0,4)^4 \cdot 0,4 \cdot 0,601 \approx 0,0061;$$

$$P_6 = (0,4)^5 \cdot 0,4 \cdot 0,601 \approx 0,0024.$$

Проверим выполнение нормирующего условия работы СМО в стационарном режиме:

$$\sum_{k=0}^{n+m} P_k(t) = 1;$$

$$P_0 + P_1 + P_2 + P_3 + P_4 + P_5 + P_6 = 0,601 + 0,2404 + 0,0962 + 0,0385 + 0,0154 + 0,0061 + 0,0024 = 1.$$

Условие выполнено, следовательно, расчеты верны.

Найдем по формуле (5) среднее число машин, простаивающих из-за выхода из строя агрегатов:

$$N_0 = 1P_3 + 2P_4 + 3P_5 + 4P_6 \approx 0,097.$$

Тогда надежность работы группы машин (СТ)

$$\Delta H = (4 - 0,097) / 4 \cdot 100 \% = 97,6 \%.$$

Если бы агрегаты не выходили из строя, то надежность работы составила бы 100 %. Следовательно, 2,4 % потеряно из-за того, что агрегаты работают не вполне надежно.

Рассчитаем, насколько повысилась бы надежность СТ, если бы она работала без запасных агрегатов, но каждую машину обслуживала бы своя ремонтная бригада. В этом случае по условиям задачи на каждую единицу СТ поступает поток неисправностей с плотностью $\lambda_0 = 1/100 = 0,01$. Время восстановления $t_{\text{обс}} = 10$ ч.

В этих условиях математическая модель задачи будет являться одноканальной СМО с отказами. Тогда вероятность выхода каждой единицы СТ из строя из-за неисправности агрегата можно определить по формуле Эрланга, где

$$\alpha_0 = \lambda_0 \overline{t_{\text{обс}}} = 0,01 \cdot 10 = 0,1.$$

Тогда

$$P_{\text{отк}} = 0,1/(1 + 0,1) \approx 0,091.$$

Отсюда среднее число машин, простаивающих из-за выхода из строя агрегатов, составит:

$$N_0 = 4P_{\text{отк}} = 0,364.$$

Тогда

$$\Delta H = \frac{4 - 0,364}{4} \cdot 100 \% \approx 91 \%.$$

Таким образом, надежность в этом случае будет на 6,6 % ниже, чем в случае с двумя запасными агрегатами. Кроме того, потребуется в 4 раза больше ремонтных бригад. Учитывая стоимость запасных частей, затраты на содержание ремонтных бригад, доход от повышения надежности, можно определить, какой из этих способов целесообразен с экономической точки зрения.

Результаты и их обсуждение

Произведенные в рамках рассмотренного примера расчеты показывают, что надежность функционирования специальной техники не вполне удовлетворительна. Для снижения риска и повышения эффективности работы группы однотипных машин (СТ) необходимо увеличить число запасных частей, чтобы надежность работы СТ приблизилась к 99,9 %, что соответствует нормативному значению вероятности отказа $P_n = 0,001$. Для повышения надежности можно также увеличить количество ремонтных бригад. Среди различных вариантов решения задачи следует выбрать оптимальный по стоимости.

Для определения экономически целесообразного количества запасных частей и числа операторов, производящих ремонт СТ, предлагается воспользоваться формулой, которая среди всех вариантов позволила бы выбрать тот, который бы обеспечивал минимум потерь при эксплуатации специальной техники [22]:

$$\min C_0 = nC_{\text{зап}} + (cC_{\text{оп}} + C_{\text{пр}}P_{\text{отк}})T_a,$$

где $C_{\text{зап}}$ — стоимость запасных частей;

$C_{\text{оп}}$ — стоимость содержания одного оператора в единицу времени;

$C_{\text{пр}}$ — стоимость единицы времени простоя СТ;

T_a — среднее время амортизации запасного блока (части).

Располагая экономическими показателями (стоимость запасных частей, затраты на содержание ремонтных бригад, показатели надежности), можно определить, какой из планов целесообразен с экономической точки зрения.

Заключение

Методы математического моделирования находят широкое применение для выработки оптимальных управленческих решений в оперативной деятельности МЧС России при планировании мероприятий по защите населения и территорий от ЧС.

В настоящей статье с применением математического аппарата теории очередей и систем массового обслуживания рассмотрен вариант решения актуальной задачи обоснования резерва запасных частей для специальной техники пожарно-спасательных подразделений, необходимого для проведения аварийно-спасательных работ в зоне ликвидации ЧС.

Сформулируем ряд задач оперативной деятельности МЧС России, решение которых можно осуществить с применением представленной методики: обоснование структуры и организации функционирования мобильного госпиталя МЧС России [9]; оценка эффективности функционирования поста радиационно-химического и биологического наблюдения в зоне ЧС [10]; расчет показателей эффективности функционирования производственно-технического центра МЧС России; моделирование мероприятий технической эксплуатации средств электронно-вычислительной и оргтехники в системе МЧС России [18]; оценка риска отказа в работе специальной техники в ходе ликвидации чрезвычайной ситуации [19].

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Методические рекомендации по созданию, хранению, использованию и восполнению резервов материальных ресурсов для ликвидации чрезвычайных ситуаций природного и техногенного характера. — М. : МЧС России, 2018. — 65 с.

2. О защите населения и территорий от чрезвычайных ситуаций природного и техногенного характера : Федер. закон от 21.12.1994 № 68-ФЗ (ред. от 23.06.2016). URL: http://www.consultant.ru/document/cons_doc_LAW_5295/ (дата обращения: 05.02.2019).
3. *Batkovskiy A. M., Fomina A. V., Semenova E. G., Trofimets V. Ya., Trofimets E. N.* Method for adjusting current appropriations under irregular funding conditions // *Journal of Applied Economic Sciences*. — 2016. — Vol. XI, Issue 5(43). — P. 828–841.
4. *Кривошонов В. В., Малыгин И. Г., Сай В. В.* Система обеспечения безопасности от рисков при производстве пожарной техники // *Проблемы управления рисками в техносфере*. — 2008. — № 4(8). — С. 61–68.
5. *Balychev S. Yu., Batkovskiy A. M., Kravshuk P. V., Trofimets V. Ya., Trofimets E. N.* Situational modeling of transportation problems: applied and didactic aspects // *Espacios*. — 2018. — Vol. 39, No. 10. — P. 27.
6. *Черных А. К., Вилков В. Б.* Управление безопасностью транспортных перевозок при организации материального обеспечения сил и средств МЧС России в условиях чрезвычайной ситуации // *Пожаровзрывобезопасность/Fire and Explosion Safety*. — 2016. — Т. 25, № 9. — С. 52–59. DOI: 10.18322/PVB.2016.25.09.52-59.
7. Guidelines for chemical transportation safety, security, and risk management. — New York – New Jersey : Center for Chemical Process Safety, John Wiley & Sons, Inc., 2008. — 202 p. DOI: 10.1002/9780470924860.
8. Terrorism and international transport: towards risk-based security policy. — Paris : OECD Publishing, 2009. — 150 p. DOI: 10.1787/9789282102329-en.
9. *Каменецкая Н. В., Медведева О. М., Хитов С. Б.* Математическое моделирование при решении задач обоснования структуры и организации функционирования мобильного госпиталя МЧС России // *Вестник Санкт-Петербургского университета Государственной противопожарной службы МЧС России*. — 2016. — № 1. — С. 62–67.
10. *Каменецкая Н. В., Медведева О. М., Хитов С. Б.* Применение методов математического моделирования при решении задачи выявления и оценки радиационной, химической и биологической обстановки в зоне чрезвычайной ситуации // *Проблемы управления рисками в техносфере*. — 2016. — № 2(38). — С. 64–69.
11. *Akbar N. S., Beg O. A.* (eds). Modeling and simulation in engineering sciences. — New York : iTeXLi, 2016. — 289 p. DOI: 10.5772/62109.
12. *Fitzgibbon W., Kuznetsov Yu. A., Neittaanmäki P., Pironneau O.* (eds). Modeling, simulation and optimization for science and technology. — Amsterdam : Springer, 2014. — 248 p. DOI: 10.1007/978-94-017-9054-3.
13. *Siddiqi A. H., Manchanda P., Bhardwaj R.* Mathematical models, methods and applications. — New York : Springer, 2015. — 309 p. DOI: 10.1007/978-981-287-973-8.
14. *Giordano F. R., Fox W. P., Horton S. B.* A first course in mathematical modeling. — 5th ed. — Boston : Cengage Learning, 2013. — 704 p.
15. *Habib M.* (ed.). Empirical modeling and its applications. — New York : ExLi4EvA, 2016. — 146 p. DOI: 10.5772/61406.
16. *Meerschaert M. M.* Mathematical modeling. — 4th ed. — New York : Academic Press, 2013. — 368 p.
17. *Yang Xin-She* (ed.). Mathematical modeling with multidisciplinary applications. — New York : John Wiley & Sons, 2013. — 592 p. DOI: 10.1002/9781118462706.
18. *Каменецкая Н. В., Корольков А. П., Хитов С. Б.* Математическое моделирование мероприятий технической эксплуатации средств электронно-вычислительной и оргтехники в системе МЧС России // *Проблемы управления рисками в техносфере*. — 2017. — № 4(44). — С. 89–94.
19. *Каменецкая Н. В., Медведева О. М., Хитов С. Б., Маслаков М. Д.* Методика оценки риска отказа в работе специальной техники в ходе ликвидации чрезвычайной ситуации // *Пожаровзрывобезопасность/Fire and Explosion Safety*. — 2018. — Т. 27, № 2-3. — С. 5–13. DOI: 10.18322/PVB.2018.27.02-03.5-13.
20. *Каменецкая Н. В., Медведева О. М., Хитов С. Б.* Анализ входящего потока объектов при математическом моделировании систем массового обслуживания // *Приоритетные научные направления: от теории к практике : материалы XXXVIII Международной научно-практической конференции*. — Новосибирск : Центр развития научного сотрудничества, 2017. — С. 156–162.
21. *Лукин А. И.* Системы массового обслуживания: анализ систем массового обслуживания с отказами в военной практике. — М. : Воениздат, 1980. — 189 с.
22. *Новиков О. А., Петухов С. И.* Прикладные вопросы теории массового обслуживания. — М. : Советское радио, 1969. — 400 с.
23. *Вагнер Г.* Основы исследования операций / Пер. с англ. — М. : Мир, 1973. — Т. 3. — 504 с.

REFERENCES

1. *Methodical recommendations on creation, storage, use and replenishment of reserves of material resources for liquidation of emergency situations of natural and technogenic character*. Moscow, Emercom of Russia Publ., 2018. 65 p. (in Russian).
2. *On protection of population and territories from natural and man-made emergencies*. Federal law of Russia on 21 December 1994 No. 68-FZ (ed. on 23 June 2016) (in Russian). Available at: http://www.consultant.ru/document/cons_doc_LAW_5295/ (Accessed 5 February 2019).
3. A. M. Batkovskiy, A. V. Fomina, E. G. Semenova, V. Ya. Trofimets, E. N. Trofimets. Method for adjusting current appropriations under irregular funding conditions. *Journal of Applied Economic Sciences*, 2016, vol. XI, issue 5(43), pp. 828–841.
4. V. V. Krivoshonok, I. G. Malygin, V. V. Say. Safety system in fire equipment manufacturing. *Problemy upravleniya riskami v tekhnosfere / Problems of Technosphere Risk Management*, 2008, no. 4(8), pp. 61–69 (in Russian).
5. S. Yu. Balychev, A. M. Batkovskiy, P. V. Kravshuk, V. Ya. Trofimets, E. N. Trofimets. Situational modeling of transportation problems: applied and didactic aspects. *Espacios*, 2018, vol. 39, no. 10, p. 27.
6. A. K. Chernykh, V. B. Vilkov. Management of transportation safety at the organization of material maintenance of forces and means Emercom of Russia in Emergencies. *Pozharovzryvobezopasnost/Fire and Explosion Safety*, 2016, vol. 25, no. 9, pp. 52–59 (in Russian). DOI: 10.18322/PVB.2016.25.09.52-59.
7. *Guidelines for chemical transportation safety, security, and risk management*. New York – New Jersey, Center for Chemical Process Safety, John Wiley & Sons, Inc., 2008. 202 p. DOI: 10.1002/9780470924860.
8. *Terrorism and international transport: towards risk-based security policy*. Paris, OECD Publishing, 2009. 150 p. DOI: 10.1787/9789282102329-en.
9. N. V. Kamenetskaya, O. M. Medvedeva, S. B. Khitov. Mathematical modeling in problem of solving situation of explanation of the structure and functioning of the field hospital of Emercom of Russia. *Vestnik Sankt-Peterburgskogo universiteta Gosudarstvennoy protivopozharnoy sluzhby MChS Rossii / Herald of St. Petersburg University of State Fire Service of Emercom of Russia*, 2016, no. 1, pp. 62–67 (in Russian).
10. N. V. Kamenetskaya, O. M. Medvedeva, S. B. Khitov. Application of methods of mathematical modelling at the solution of the problem of identification and the assessment of radiation, chemical and biological situation in zone of emergency. *Problemy upravleniya riskami v tekhnosfere / Problems of Technosphere Risk Management*, 2016, no. 2(38), pp. 64–69 (in Russian).
11. N. S. Akbar, O. A. Beg (eds). *Modeling and simulation in engineering sciences*. New York, iTeXLi, 2016. 289 p. DOI: 10.5772/62109.
12. W. Fitzgibbon, Yu. A. Kuznetsov, P. Neittaanmäki, O. Pironneau (eds). *Modeling, simulation and optimization for science and technology*. Amsterdam, Springer, 2014. 248 p. DOI: 10.1007/978-94-017-9054-3.
13. A. H. Siddiqi, P. Manchanda, R. Bhardwaj. *Mathematical models, methods and applications*. New York, Springer, 2015. 309 p. DOI: 10.1007/978-981-287-973-8.
14. F. R. Giordano, W. P. Fox, S. B. Horton. *A first course in mathematical modeling*. 5th ed. Boston, Cengage Learning, 2013. 704 p.
15. M. Habib. (ed.). *Empirical modeling and its applications*. New York, ExLi4EvA, 2016. 146 p. DOI: 10.5772/61406.
16. M. M. Meerschaert. *Mathematical modeling*. 4th ed. New York, Academic Press, 2013. 368 p.
17. Yang Xin-She (ed.). *Mathematical modeling with multidisciplinary applications*. New York, John Wiley & Sons, 2013. 592 p. DOI: 10.1002/9781118462706.
18. N. V. Kamenetskaya, A. P. Korolkov, S. B. Khitov. Mathematical modeling of technical exploitation's activities of electronic computers and office equipment in the system of Emercom of Russia. *Problemy upravleniya riskami v tekhnosfere / Problems of Technosphere Risk Management*, 2017, no. 4(44), pp. 89–94 (in Russian).
19. N. V. Kamenetskaya, O. M. Medvedeva, S. B. Khitov, M. D. Maslakov. Methodology of estimation of the failures's risks in the work of special technical means in emergency situations. *Pozharovzryvobezopasnost/Fire and Explosion Safety*, 2018, vol. 27, no. 2-3, pp. 5–13 (in Russian). DOI: 10.18322/PVB.2018.27.02-03.5-13.
20. N. V. Kamenetskaya, O. M. Medvedeva, S. B. Khitov. The objects incoming flow analysis in the queuing systems mathematical modeling. In: *Prioritetnyye nauchnyye napravleniya: ot teorii k praktike* [Priority scientific areas: from theory to practice]. Proceeding of XXXVIII International Scientific-Practical Conference. Novosibirsk, Publishing House of the Central News Service, 2017, pp. 156–162 (in Russian).

21. A. I. Lukin. *Sistemy massovogo obsluzhivaniya: analiz sistem massovogo obsluzhivaniya s otkazami v voyennoy praktike* [Queuing systems: Analysis of queuing systems with rejections in military practice]. Moscow, Voenizdat Publ., 1980. 189 p (in Russian).
22. O. A. Novikov, S. I. Petukhov. *Prikladnyye voprosy teorii massovogo obsluzhivaniya* [Applied questions of queuing theory]. Moscow, Sovetskoye radio Publ., 1969. 400 p (in Russian).
23. H. M. Wagner. *Principles of operations research*. New Jersey, Prentice-Hall, 1969 (Russ. ed.: H. M. Wagner. *Osnovy issledovaniya operatsiy*. Moscow, Mir Publ., 1972, vol. 3. 504 p.).

Поступила 10.02.2019; после доработки 26.03.2019; принята к публикации 30.03.2019
Received 10 February 2019; received in revised form 26 March 2019; accepted 30 March 2019

Информация об авторах

КАМЕНЕЦКАЯ Наталия Владимировна, канд. техн. наук, доцент, профессор кафедры высшей математики и системного моделирования сложных процессов, Санкт-Петербургский университет ГПС МЧС России, г. Санкт-Петербург, Российская Федерация; ORCID: 0000-0002-8575-4877, Researcher ID: P-7170-2019, e-mail: natkam53@mail.ru

МЕДВЕДЕВА Ольга Марленовна, канд. техн. наук, доцент, доцент кафедры высшей математики и системного моделирования сложных процессов, Санкт-Петербургский университет ГПС МЧС России, г. Санкт-Петербург, Российская Федерация; ORCID: 0000-0002-7644-8691, Researcher ID: P-8572-2019, e-mail: mom65@mail.ru

ХИТОВ Сергей Борисович, Западный военный округ Министерства обороны Российской Федерации, г. Санкт-Петербург, Российская Федерация; ORCID: 0000-0001-7565-9780, Researcher ID: P-1280-2019; e-mail: khitoff_s@mail.ru

СИЛЬНИКОВ Михаил Владимирович, д-р техн. наук, профессор, профессор кафедры переподготовки и повышения квалификации специалистов, Санкт-Петербургский университет ГПС МЧС России, г. Санкт-Петербург, Российская Федерация; ORCID: 0000-0002-7960-0863, Researcher ID: Y-9143-2018, e-mail: director@npo-sm.ru

Information about the authors

Nataliya V. KAMENETSKAYA, Cand. Sci. (Eng.), Docent, Professor of Higher Math and System Modeling of Complex Processes Department, Saint Petersburg University of State Fire Service of Emercom of Russia, Saint Petersburg, Russian Federation; ORCID: 0000-0002-8575-4877, Researcher ID: P-7170-2019, e-mail: natkam53@mail.ru

Olga M. MEDVEDEVA, Cand. Sci. (Eng.), Docent, Associate Professor of Higher Math and System Modeling of Complex Processes Department, Saint Petersburg University of State Fire Service of Emercom of Russia, Saint Petersburg, Russian Federation; ORCID: 0000-0002-7644-8691, Researcher ID: P-8572-2019, e-mail: mom65@mail.ru

Sergey B. KHITOV, Western Military District of the Ministry of Defense of the Russian Federation, Saint Petersburg, Russian Federation; ORCID: 0000-0001-7565-9780, Researcher ID: P-1280-2019, e-mail: khitoff_s@mail.ru

Mikhail V. SILNIKOV, Dr. Sci. (Eng.), Professor, Professor of Department of Retraining and Advanced Training of Specialists, Saint Petersburg University of State Fire Service of Emercom of Russia, Saint Petersburg, Russian Federation; ORCID: 0000-0002-7960-0863, Researcher ID: Y-9143-2018, e-mail: director@npo-sm.ru

<https://doi.org/10.18322/PVB.2019.28.03.14-35>
УДК 614.83;536.46

Влияние на развитие газового взрыва в помещении расстояния между местом воспламенения и окном

© Ю. Х. Поландов^{1✉}, С. А. Добриков^{1, 2}

¹ Орловский государственный университет им. И. С. Тургенева
(Россия, 302026, г. Орел, ул. Комсомольская, 95)

² ООО «МЕРА-НН» (Россия, 603163, г. Нижний Новгород, ул. Деловая, 13)

РЕЗЮМЕ

Введение. Доселе было известно, что при газовых взрывах в незамкнутой камере давление взрыва тем больше, чем дальше от сбросного проема (окна) находится место воспламенения газа. Это утверждение основано на результатах, полученных рядом исследователей, в том числе нами. Однако последние физические опыты показали, что это справедливо только при размерах окон, сопоставимых с теми, которые рекомендуются нормативами как обеспечивающие определенные условия безопасности. При меньших же размерах окон эта зависимость нивелируется, и более того, меняет знак на противоположный.

Задачей исследования является выяснение причины инверсии влияния расстояния между окном и местом воспламенения на давление взрыва. Решение этой задачи имеет научное и практическое значение.

Методы и средства исследования. Для исследования выявленного эффекта были использованы два варианта математической модели развития газового взрыва в незамкнутой камере — упрощенная и численная. Первая из них, упрощенная, основана на представлении камеры в виде сосредоточенного объема, использовании уравнения Клайперона в дифференциальной форме. Получено, что, помимо известных факторов, таких как размер окна, свойства истекающих газов и др., на развитие взрыва влияют площадь фронта пламени и момент его подхода к окну. К сожалению, эта модель в принципе не учитывает динамику развития последних факторов. Сделать это позволяет другая модель, численная, представленная программным продуктом «Вулкан-М», основанным на решении методом крупных частиц системы уравнений газовой динамики в эйлеровской форме при добавлении условий распространения пламени. Кроме того, «Вулкан-М» позволяет визуализировать эволюцию физического процесса, регистрировать развитие его параметров и показателей.

Результаты исследования. Получено, что при размерах окна, сравнимых с нормативными, столь большое влияние его положения на давление определяется не только разницей свойств истекающих газов (исходной смеси и продуктов сгорания), но и тем, что в начальный период развития взрыва площадь фронта пламени в случае удаленного положения окна значительно больше, чем при малом расстоянии между ним и местом воспламенения. При малом окне темп набора давления в начальный период в обоих случаях взрыва высок и практически одинаков, поэтому решающее влияние на значение максимального давления оказывает время горения. При удаленном расположении окна от места воспламенения время горения меньше по сравнению с близким расположением. В результате этого максимум давления во втором случае больше, чем в первом. Этим и объясняется обнаруженный эффект.

Вывод. Чем больше размер окна, тем сильнее его влияние на давление взрыва. Причем это влияние не только обуславливается истечением газов, но и усиливается, иногда значительно, через влияние на развитие фронта пламени. При уменьшении размеров окна его влияние на развитие фронта пламени ослабляется, доходя до ничтожного. В этом случае на давление взрыва, помимо размера окна, влияет время горения.

Ключевые слова: дефлаграционный взрыв; незамкнутый объем; давление взрыва; размер окна; положение окна; физический эксперимент; численный эксперимент; фронт пламени.

Признательность. Авторы признательны Институту комплексной безопасности в строительстве при НИУ МГСУ за поддержку и предоставление возможности проведения физических экспериментов.

Для цитирования: Поландов Ю. Х., Добриков С. А. Влияние на развитие газового взрыва в помещении расстояния между местом воспламенения и окном // Пожаровзрывобезопасность/Fire and Explosion Safety. — 2019. — Т. 28, № 3. — С. 14–35. DOI: 10.18322/PVB.2019.28.03.14-35.

✉ Поландов Юрий Христофорович, e-mail: polandov@yandex.ru

Введение

Принято считать, и это доказано экспериментально, что при газовых взрывах* увеличение расстояния между местом воспламенения газовой смеси и сбросным проемом, или окном сброса давления (да-

лее — окном), приводит к росту давления, в том числе его максимального значения $p_{\max}^{**}$. Этот результат вообще известен, подтвержден и нами при испытаниях в камере объемом 0,125 и 10 м³ в форме куба [1, 2], а также коллегами из США (в камере объемом 63 м³) [3] и Великобритании [4].

* Рассматривается газовый дефлаграционный взрыв без турбулизации пламени и вибрационного горения.

** Имеется в виду максимальное значение давления при взрыве.

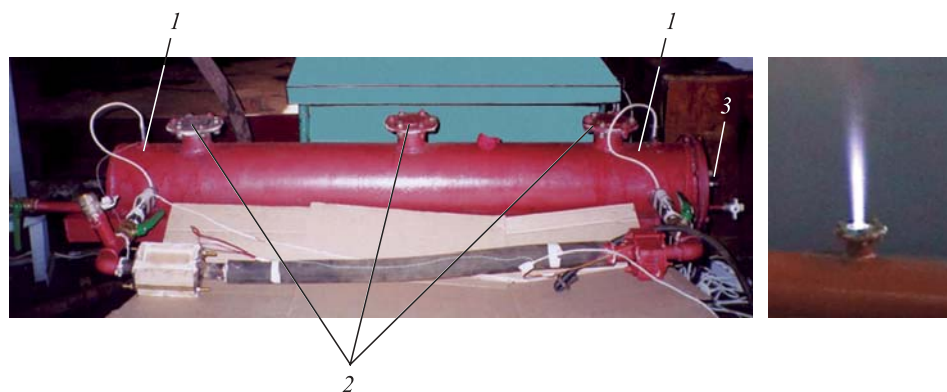


Рис. 1. Общий вид камеры установки “Сержант” и фрагмент опытного взрыва: 1 — датчики давления; 2 — окна сброса давления; 3 — устройство воспламенения

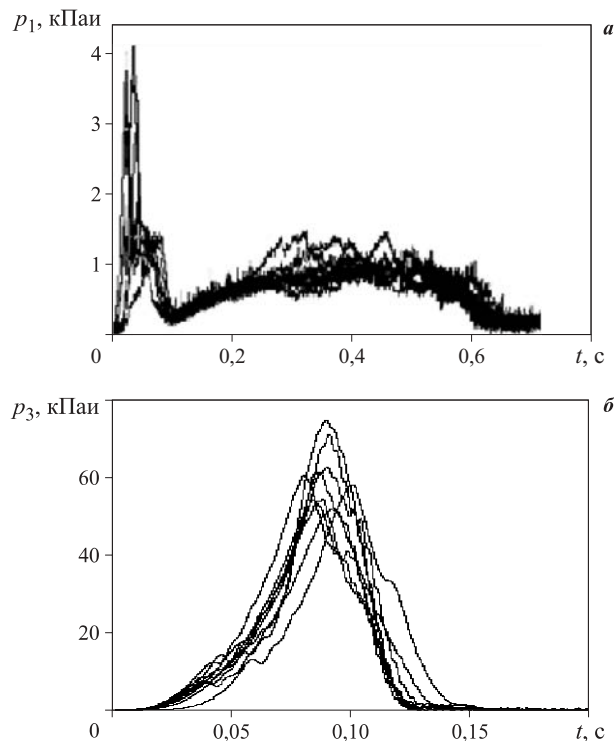


Рис. 2. Ход давления при взрывах в камере с окном диаметром 60 мм в поз. 1 (а) и поз. 3 (б)

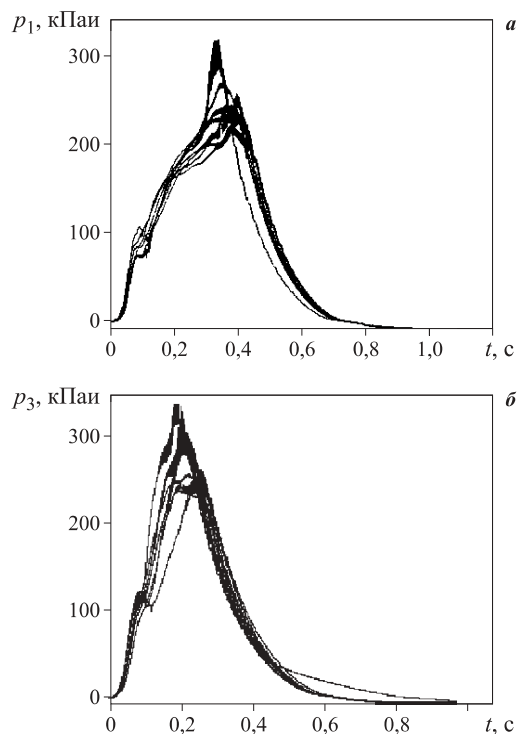


Рис. 3. Ход давления при взрывах в камере с окном диаметром 20 мм в поз. 1 (а) и поз. 3 (б)

Однако самые впечатляющие результаты были получены на установке “Сержант” [5], имеющей камеру длиной $l = 1,5$ м и диаметром $d = 200$ мм (рис. 1), на которой исследовалось влияние размеров и положения окна на развитие взрыва. Камера заполнялась газовой стехиометрической смесью *пропан – воздух*. Результаты исследований приведены на рис. 2 и 3, на которых совмещены данные 10 опытов по каждому из вариантов. На них видна приемлемая воспроизводимость результатов, что позволяет говорить об их неслучайности.

Далее принято, что в численных экспериментах воспламенение газовой смеси производится всегда у левого фланца*. При этом местоположение окна у этого фланца — это будет позиция 1, у правого

фланца — позиция 3, а по центру камеры — позиция 2. Соответственно, будем обозначать ход давления, которое развивается при взрыве в помещении с окном, находящимся в поз. 1, как $p_1(t)$, а в поз. 3 — как $p_3(t)$.

Из рис. 2 видно, что значения $p_{\max}$ при взрывах в камерах с окном диаметром 60 мм, устанавливаемым в поз. 1 и 3, будут различаться более чем в 10 раз, т. е. $p_{3\max} > 10p_{1\max}$.

В то же время другие результаты, полученные на этой же установке, свидетельствуют о том, что при диаметре окна 20 мм наблюдается инверсия зависимости $p_{\max}$ от позиции окна (рис. 3). Судя по графикам рис. 2 и 3, видно, что, во-первых, давление $p_3(t)$ по сравнению с $p_1(t)$ значительно возросло (но это и понятно: размер окна уменьшился) и, во-вторых, теперь (см. рис. 3) $p_{3\max} < p_{1\max}$, т. е. знак неравенства развернулся в противоположную

* В физическом эксперименте (см. рис. 1) воспламенение производилось справа.

сторону. Заметим также, что пики давления между собой сдвинуты: $p_{3\max}$ наступает раньше, чем $p_{1\max}$.

В связи с этим и поставлена задача выяснения причины инверсии влияния на развитие газового взрыва места установки окна при изменении его размеров. Решение такой задачи имеет не только научный, но и практический интерес.

Рабочая гипотеза

Понятно, что в замкнутом объеме (без окна) влияние окна на развитие пламени исключено, а в камере с окном оно возникает. Отсюда логично вытекает постулат, что чем больше размер окна, тем значительнее его влияние на процесс взрыва. При этом на него оказывает влияние не только размер окна, но и другие условия развития взрыва. В первую очередь, речь идет о положении окна (в частности, его удаленности) относительно места воспламенения газовой смеси.

Однако объяснить обнаруженный эффект, зная лишь размер окна и свойства истекающих газов, не представляется возможным. И в самом деле, если при взрывах в камере с окном с $d = 60$ мм расхождение между $p_1(t)$ и $p_3(t)$ еще можно трактовать как следствие разницы в свойствах исходной смеси и продуктов сгорания, то результаты взрыва в камере с окном с $d = 20$ мм, когда $p_3(t)$ больше, чем $p_1(t)$, это не удастся. Остается предположить, что, помимо влияния размера окна и свойств истекающих газов, на процессе взрыва сказывается влияние и других факторов, круг которых можно определить, прибегнув к анализу математических моделей взрыва.

Упрощенная математическая модель

В связи с тем что выявленная зависимость характерна в первую очередь для цилиндрических камер с большим отношением l/d , а для установки “Сержант” оно равно 7,5, дальнейшие исследования проводятся именно в такой камере.

В первую очередь рассмотрим распространенную, во многом упрощенную модель взрыва в помещении при условии одинакового давления во всех его точках или, как пишут некоторые авторы, “квазистатичности” или “квазистационарности” давления в помещении [5, 6]. Надо отметить, что применение этих терминов неудачно, так как в физике и механике они уже известны и используются в другом контексте. В то же время в механике есть понятия распределенных и сосредоточенных параметров, например массы. По аналогии с этим можно и в нашем случае говорить о сосредоточенном объеме и представлять объем камеры в виде точки, приписывая ей параметры газа. Кроме этого важного условия, примем также условие неизменности состава газа, не-

смотря на протекание химической реакции при горении*, а свойства газа — идеальными. Тогда для смеси газов в камере справедливо уравнение газового состояния

$$pV = MRT_{\text{ср}}, \quad (1)$$

где p — давление, Па;

V — объем камеры, м^3 ;

M — масса газов, участвующих в процессе, кг;

$M = \text{const}$;

R — газовая постоянная, Дж/(кг·К);

$T_{\text{ср}}$ — среднее значение температуры газов в камере, К.

Продифференцируем уравнение (1) по времени. При этом примем во внимание, что оно справедливо при неизменном количестве (при одной и той же массе) газа, хотя, на первый взгляд, мы имеем дело с истечением газов из камеры, т. е. с переменной массой. Однако если считать истекающий газ расширением объема и его частью, то значение массы газа условно останется постоянным. Уместно упомянуть, что некоторые авторы считают, что процесс взрыва и расширение газов в камере происходят по адиабатическому закону [6, 7], а другие соглашались с тем, что в результате взрыва изменяется масса газов, находящихся в камере [8]. В первом случае ошибка авторов заключается в том, что температура газов повышается не только согласно адиабате, но и в результате горения, т. е. процесс взрыва политропичен. В другом случае нарушается правило неизменности массы газов, участвующих в процессе, что ошибочно, так как при этом исключается возможность применения уравнения газового состояния.

Перейдем к дифференциальной форме уравнения (1):

$$\frac{dp}{dt} = -\frac{p}{V} \frac{dV}{dt} + \frac{MR}{V} \frac{dT_{\text{ср}}}{dt}. \quad (2)$$

В первом члене правой части уравнения (2) значение производной выражает интенсивность расширения объема и определяется через объемный расход:

$$dV/dt = F_0 w, \quad (3)$$

где F_0 — эффективная площадь окна, м^2 ;

w — скорость истечения, м/с.

Можно выделить три случая истечения газов в зависимости от давления в камере, для которых скорость истечения будет определяться по следующим формулам:

1) при $p \leq 0,2p_a$ (где p_a — атмосферное давление, Па) истекающий газ можно принять за несжимаемую жидкость:

* Вносимая в значение газовой постоянной ошибка не превышает 3 %.

$$w = \sqrt{2(p - p_a)/\rho_i}, \quad (3.1)$$

где $\rho_i = \rho_1$ — плотность исходной смеси газов в камере, кг/м³;

$\rho_i = \rho_2$ — плотность продуктов сгорания в камере, кг/м³;

2) при $0,2p_a < p < p_{кр}$ (где $p_{кр}$ — давление, при котором наступает критическое истечение, МПа; $p_{кр} \approx 0,19$ МПа) имеет место докритическое истечение:

$$w = \sqrt{\frac{2k}{k+1} \frac{p}{\rho_i} \left(1 - \frac{p_a}{p}\right)^{\frac{k-1}{k}}}, \quad (3.2)$$

где k — показатель адиабаты; $k = C_p/C_v$; $k = 1,4$ — для исходной смеси, $k = 1,25$ — для продуктов сгорания;

значения отношения $2k/(k+1)$ меняются незначительно: от 1,11 до 1,16 — при истечении соответственно продуктов сгорания и исходной смеси газов;

3) при $p \geq p_{кр}$ истечение становится критическим:

$$w = \sqrt{\frac{2k}{k+1} \frac{p}{\rho_i}} = \beta \sqrt{\frac{p}{\rho_i}}, \quad (3.3)$$

где $\beta = \sqrt{2k/(k+1)}$ мало меняется — от 0,64 до 0,68 при истечении соответственно продуктов сгорания и исходной смеси газов.

Далее. Во втором члене правой части уравнения (2) среднее значение температуры в камере T_{cp} в силу аддитивности свойств смеси газов определено как средневзвешенное:

$$T_{cp} = \frac{M_1 T_1 + M_2 T_2}{M} = \frac{(M - M_2) T_1 + M_2 T_2}{M} = T_1 + \frac{M_2}{M} (T_2 - T_1),$$

где M_1, M_2 — масса соответственно исходной смеси газов и продуктов сгорания, кг;

T_1, T_2 — температура соответственно исходной смеси газов и продуктов сгорания, К.

Отсюда, в силу того что T_1 и T_2 являются энергетической характеристикой данной смеси и их значения известны:

$$T_2 - T_1 = q/C,$$

значение производной dT_{cp}/dt определится как

$$\frac{dT_{cp}}{dt} = \frac{T_2 - T_1}{M} \frac{dM_2}{dt} = \frac{q}{CM} \frac{dM_2}{dt},$$

где q — удельная теплота сгорания газовой смеси, Дж/кг;

C — удельная теплоемкость газовой смеси, Дж/(кг·К).

Примем во внимание, что $dM_2/dt = U_n F_\phi \rho_1$. Тогда

$$\frac{dT_{cp}}{dt} = \frac{q}{CM} U_n F_\phi \rho_1, \quad (4)$$

где U_n — скорость нормального горения, м/с;

F_ϕ — площадь фронта пламени, м².

Подставив величины из (3) и (4) в уравнение (2), получим:

$$\frac{dp}{dt} = -\frac{p}{V} w F_0 + \frac{MR}{V} \frac{q}{CM} U_n F_\phi \rho_1.$$

Проведем преобразования данного уравнения с учетом того, что

$$\rho_1 = \rho_{1a} (p/p_a)^{1/k},$$

и получим окончательное уравнение, связывающее темп нарастания (или спада) давления с важнейшими показателями процесса:

$$\frac{dp}{dt} = -\frac{p}{V} w F_0 + \frac{R}{V} \frac{q}{C} \rho_{1a} \left(\frac{p}{p_a}\right)^{1/k} U_n F_\phi, \quad (5)$$

где ρ_{1a} — плотность исходной смеси при нормальном давлении, кг/м³; $\rho_{1a} = 1,22$ кг/м³.

Расчет максимального давления при взрыве

Физические опыты показывают, что своего максимума (иногда локального) давление взрыва достигает, вообще говоря, в нескольких случаях: во-первых, при $dp/dt = 0$, т. е. при равенстве слагаемых в правой части уравнения (5); во-вторых, при смене истекающей исходной смеси газов на продукты сгорания; в-третьих, при резком изменении (уменьшении) площади фронта пламени.

Рассмотрим первый случай, так как к нему можно подойти аналитически, используя уравнение (5). Остальные два варианта реализации максимального давления p_{max} рассмотрим на конкретных примерах при анализе результатов численных опытов.

При расчете максимума давления при балансе в правой части уравнения (5) относительно простым получается выражение для критического истечения ($p = p_{max}$ при известном значении k):

$$\frac{p_{max}}{V} \beta \sqrt{\frac{p_{max}}{\rho_i}} p_{max}^{-1/k} F_0 = \frac{R}{V} \frac{q}{C} \rho_{1a} p_a^{-1/k} U_n F_\phi, \quad (6)$$

откуда

$$p_{max} = \left[\left(\frac{F_\phi}{F_0} \frac{Rq}{C\beta} \rho_{1a} U_n \right) p_a^{-1/k} \rho_i^{0,5} \right]^{\frac{k}{1,5k-1}}. \quad (7)$$

При $k = 1,4$

$$p_{max} \cong \left(\frac{F_\phi}{F_0} \frac{Rq}{C\beta} \rho_{1a} U_n \right)^{1,27} p_a^{-0,91} \rho_i^{0,635}. \quad (8)$$

Согласно этой зависимости уменьшение плотности истекающей газовой смеси с 1,22 до 0,17 кг/м³ (после сгорания) может привести к снижению мак-

симального давления в камере в 3,5 раза. Правда, это справедливо только в том случае, если другие условия развития взрыва идентичны в сравниваемых случаях, что вряд ли возможно, потому что изменение одного параметра влечет за собой изменение и других.

Можно поставить и другой вопрос: если при прочих равных условиях, но при разных температурах истекающих газов давление в камере все же одинаково, то каково должно быть отношение между размерами фронтов пламени в обоих случаях? Из уравнения (8) следует, что $F_{\phi 1}/F_{\phi 2} = (\rho_2/\rho_1)^{0,5}$, тогда в нашем случае получим соотношение $F_{\phi 2} = 2,65F_{\phi 1}$.

Что касается докритических вариантов истечения, то в этих вариантах форма зависимости $w = w(\rho_i)$ выглядит несколько сложнее, поэтому ее решение не приводится. В принципе, можно обойтись анализом формул (3.1)–(3.3), выражающих скорость истечения. В них плотность истекающего газа во всех случаях входит в виде сомножителя $\rho_i^{-0,5}$, поэтому следует ожидать получения зависимости, близкой (7). Разумеется, к формуле (7) надо относиться как к приближению, так как многие показатели, входящие в нее, хоть и незначительно, но меняются в процессе взрыва. К сожалению, условия, при которых возможно использование этой формулы, встречаются нечасто.

О факторах, влияющих на развитие фронта пламени

Влияние размера площади фронта пламени F_{ϕ} на развитие взрыва согласно формуле (5) очевидно, поэтому этому вопросу исследователи уделяют достаточно внимания. Говоря о динамике этого важнейшего параметра, отметим, что турбулизация пламени согласно принятому условию не принимается в расчет, да она, судя по результатам численных опытов, и не наблюдается в камере установки “Сержант”. Представления же о развитии ламинарного пламени хорошо известны: согласно им видимый фронт пламени формируется за счет его движения со скоростью, определяемой тремя процессами: собственно горением, расширением газов при их нагреве и движением потока газов к окну для истечения.

Во-первых, еще в XIX веке, со времен русского ученого В. А. Михельсона, известно, что вектор скорости горения в газе в ламинарном пламени направлен по нормали к поверхности фронта. Скорость распространения обычно составляет несколько десятков сантиметров в секунду, в нашем случае для смеси *пропан – воздух* — от 0,38 до 0,42 м/с.

Во-вторых, в зоне горения газ расширяется, а вне этой зоны по обе ее стороны — сжимается, обеспечивая тем самым движение газов от зоны горения,

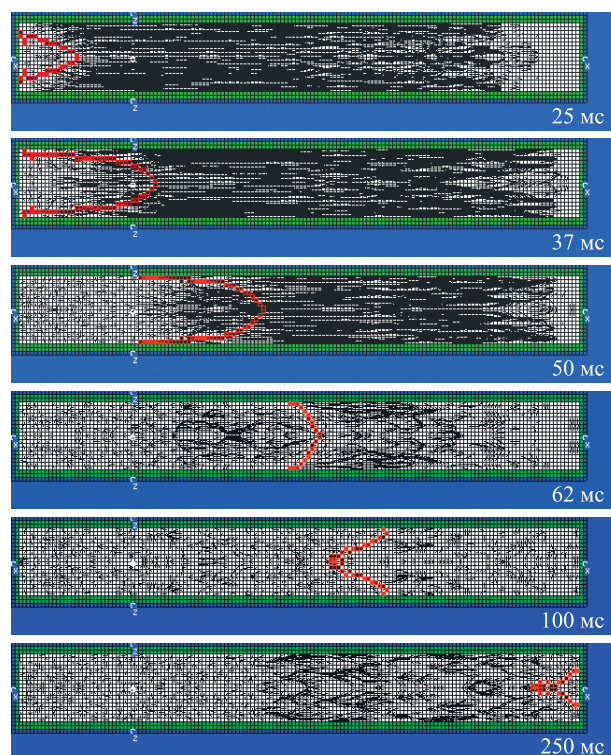


Рис. 4. Взрыв в замкнутом объеме установки “Сержант”

в том числе фронта пламени. Модуль скорости фронта тем выше, чем больше по объему слой газа, находящийся в той стороне, куда направлен этот вектор. Данный процесс наглядно прослеживается при численном моделировании газового взрыва в закрытой камере “Сержанта” и особенно характерен для начального момента развития взрыва (рис. 4). Из рисунка видно, что по оси камеры скорость фронта принимает значение, превышающее его скорость в сторону стенки камеры, что формирует известную форму пламени в виде полуэллипсоида.

В-третьих, истечение газа также влияет на форму пламени. Известно, что течение газа в цилиндрическом объеме при ламинарном режиме имеет профиль скорости, также напоминающий полуэллипсоид, вытянутый в сторону стока.

При газовом взрыве вектора всех этих скоростей складываются по правилу суперпозиции.

Численное моделирование газового взрыва

Особенность численных методов описания газовых взрывов заключается в том, что они дают возможность рассчитывать параметры газа при условии их распределения по объему. Это позволяет следить не только за изменением давления и температуры во всех расчетных ячейках, на которые разбит объем, но и за скоростью течения и траекторией потоков. Кроме того, моделируя условия распространения пламени от ячейки к ячейке, можно на-

блюдовать за развитием фронта пламени, этого краеугольного параметра, определяющего развитие взрыва. Для этого обратимся к численному моделированию взрыва в камере установки “Сержант” в соответствии с его исходными данными, используя отечественный программный продукт “Вулкан-М” [9, 10], разработанный на основе метода “крупных частиц” [11].

Моделирование взрыва в замкнутом объеме установки “Сержант”

Для анализа результатов численного моделирования весьма полезным является учет результатов расчета газового взрыва в установке “Сержант” в случае замкнутого объема камеры. Этот численный эксперимент с визуализацией фронта пламени играет роль установочного; его можно считать также контрольным с точки зрения оценки адекватности программного продукта “Вулкан-М”. Моделируется процесс в камере, заполненной смесью газов стехиометрического состава. Воспламенение смеси производится слева от фланца по оси камеры. Результаты опыта приведены на рис. 4–6. Расчетный объем разбит приблизительно на 50 тысяч ячеек, имеющих кубическую форму с длиной ребра 1 см. Фронт пламени представляется горящими ячейками, которые выделены красным цветом. На рис. 4 приведена типичная картина развития фронта. Вначале он интенсивно расширяется, приобретая форму полуэллипсоида, в результате чего его площадь становится максимальной. Затем, достигнув середины объема, он вырождается в плоскость. Это объясняется тем, что в этом случае по обе стороны от фронта пламени размеры объемов камеры, в которых происходит сжатие, одинаковы по величине, что обеспечивает их одинаковую упругость. Во второй половине объема фронт приобретает форму, почему-то называемую “тюльпаном”, хотя она, скорее всего, напоминает воронку, сливной канал которой направлен в сторону продуктов сгорания. Видимая скорость движения фронта в этой части сильно замедляется: если первую половину он проходит за 60 мс, то вторую — за 200 мс.

На рис. 5 приведены результаты расчета давления и площади фронта пламени. На рисунке видно, что максимума площадь фронта достигает через 50 мс, что совпадает с “визуальными” данными, представленными на рис. 4. При движении фронта пламени в первой половине объема темп нарастания давления очень высокий, затем по мере приближения к середине оно быстро падает. Объясняется это тем, что сжатие объема исходной смеси газов происходит тем интенсивнее, чем больше ее объем и меньше давление в камере, так как $dV/dp = -V/(kP)$, что характерно для начальной стадии развития фронта пламени. Судя по рис. 6, площадь фронта

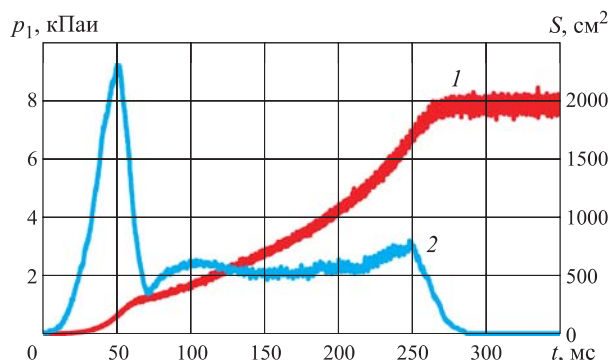


Рис. 5. Динамика развития давления (1) и площади фронта пламени (2) при взрыве в замкнутом объеме

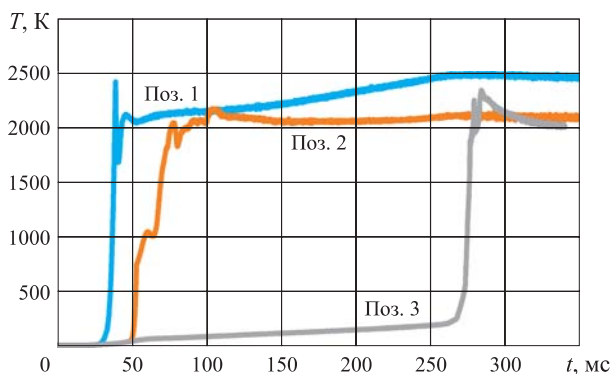


Рис. 6. Динамика температуры газов при взрыве замкнутом объеме: “датчики” у левого фланца (поз. 1), посередине камеры (поз. 2) и у правого фланца (поз. 3)

пламени в момент 50 мс после его соприкосновения со стенками камеры начинает уменьшаться, так как развитие пламени в радиальном направлении отсутствует, а в момент 75 мс фронт проходит середину камеры. Данные, представленные на рис. 5 и 6, уточняют кадры видеоряда на рис. 4.

Взрыв на установке “Сержант” с окном диаметром 60 мм

На рис. 7 и 8 приведены результаты численных опытов газовых взрывов в камере с геометрией “Сержанта” при наличии окна, которое располагалось поочередно в двух местах — рядом с местом воспламенения (поз. 1) и на противоположной стороне (поз. 3). На рис. 9 показан ход кривой давления $p_1(t)$ при положении окна в поз. 1 и $p_3(t)$ — в поз. 3. Сравним их с результатами физических опытов (см. рис. 2). Адекватность математической модели подтверждается не только качественным совпадением результатов численного и физического экспериментов, но и во многом количественным. Видно, что не только продолжительность процесса почти одинакова, но и весь ход кривых близок между собой. Таким образом, можно достаточно уверенно принимать к анализу полученные данные численного

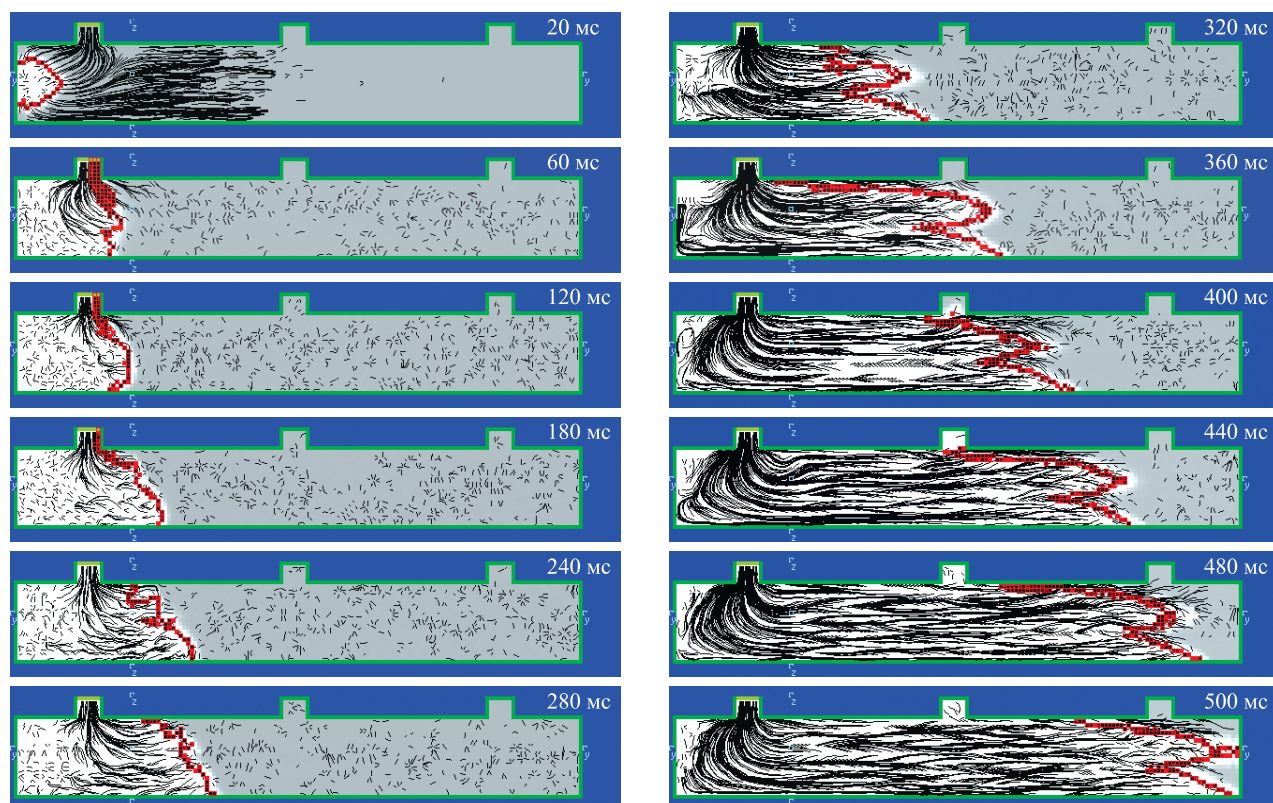


Рис. 7. Динамика развития фронта пламени при расположении окна $d = 60$ мм в поз. 1

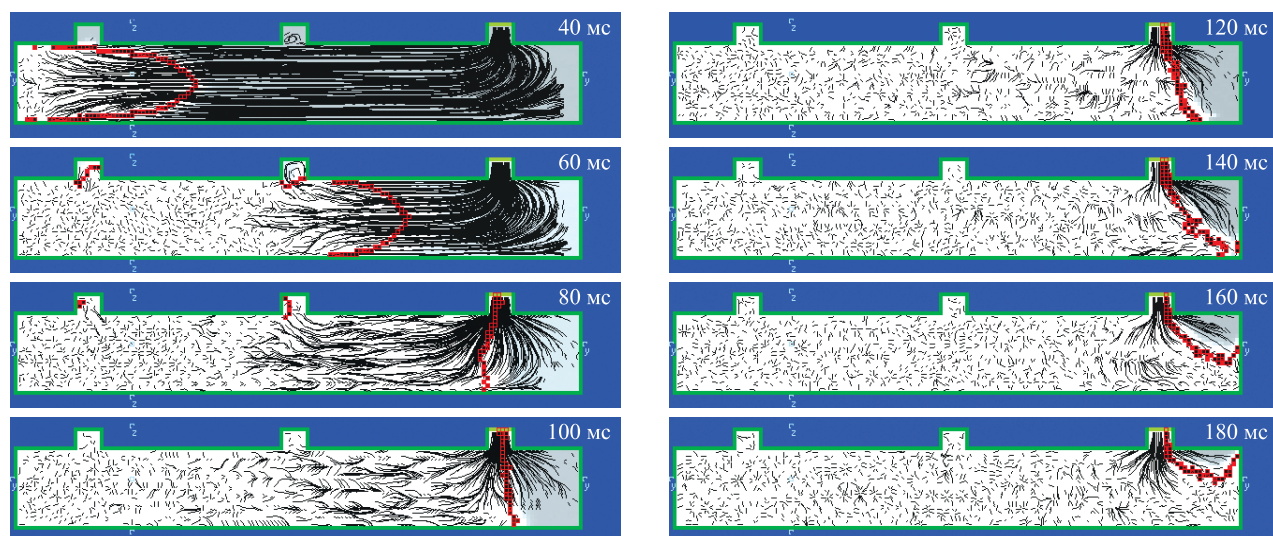


Рис. 8. Динамика развития фронта пламени при расположении окна $d = 60$ мм в поз. 3

эксперимента по развитию фронта пламени (см. рис. 7 и 8).

Положение окна в позиции 1. На рис. 7 видно, что фронт пламени после касания стенки камеры очень скоро достигает окна, после чего туда поступают и продукты сгорания, что обуславливает догорание исходной смеси в окне и за пределами камеры. За счет этого и практического равенства скоростей, с которыми фронт движется вправо за счет сжатия негоревшей части смеси и влево за счет скорости, с которой газы устремляются к окну, положе-

ние и размер фронта несколько стабилизируются, практически не меняясь вплоть до $t = 200$ мс. При этом площадь фронта остается минимально возможной, т. е. близкой к площади поперечного сечения камеры.

По прошествии 200 мс фронт отрывается от окна и медленно движется вправо с увеличением площади, которая достигает максимума в момент $t = 450$ мс. Уменьшение площади фронта наступает при его касании правого торца.

На рис. 9,а видно, что давление $p_1(t)$ имеет два максимума. Первый образуется за счет интенсивно-

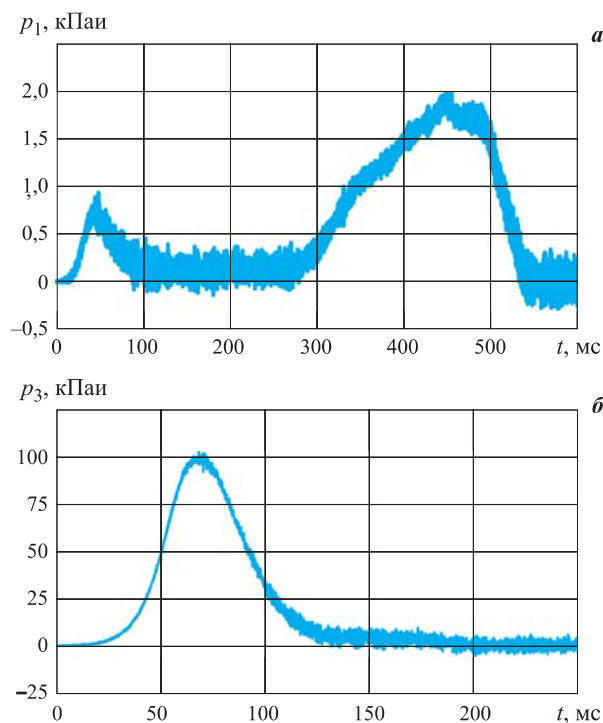


Рис. 9. Динамика развития давления при положении окна $d = 60$ мм в поз. 1 (а) и поз. 3 (б)

го расширения фронта пламени, типичного для начала его распространения, что приводит к росту давления в камере. Затем, по достижении фронтом одновременно и стенок камеры, и окна, через него начинают истекать продукты сгорания вместе с частью пламени, в результате чего давление резко падает. Второй максимум также связан с изменением площади фронта пламени. В этом случае площадь возрастает в интервале времени от 250 до 500 мс, достигая максимума, после чего уменьшается (см. рис. 7 и далее рис. 12).

Положение окна в позиции 3. В этом случае разворачивается совсем другая картина развития фронта пламени (см. рис. 8). Здесь скорости горения, сжатия газов и движения потока смеси газов к окну складываются, в результате чего фронт пламени, имеющий вначале эллипсоидную форму, сильно вытягивается и устремляется к окну, через которое истекает исходная смесь. Несмотря на то что скорость ее истечения ниже, чем продуктов сгорания, движение фронта к окну проходит весьма скоротечно, так что через 80 мс он достигает окна. После этого скорость фронта замедляется, и последние 10 % объема он проходит за те же 80 мс, при этом повторяется картина развития фронта пламени, представленная на рис. 7, в начальный период. Это наблюдение подтверждается и далее графиком на рис. 12.

На рис. 9,б видно, что давление $p_3(t)$ до момента 70 мс нарастает, в это время истекает исходная смесь. После истечения через окно продуктов сго-

рания давление падает и в интервале времени от 120 до 180 мс оно едва отличается от нуля. Время процесса взрыва в этом случае значительно меньше, чем в первом. Математическая модель показывает, что в случае, когда окно расположено рядом с местом воспламенения, сгорает практически вся исходная смесь. В то же время, когда окно находится у дальнего фланца, более 90 % исходной смеси выбрасывается из камеры.

Взрыв на установке “Сержант” с окном диаметром 20 мм

Уменьшение диаметра окна до 20 мм приводит к качественному изменению характера его влияния на процесс взрыва. Дело в том, что с уменьшением размеров окна развитие фронта пламени приближается к картине его развития в замкнутой камере, что заметно при сравнении между собой кадров на рис. 10 и 4. На это же указывает и близость значений времен процесса при положениях окна в позициях 1 и 3 на рис. 12.

Давление в камере нарастает одинаково при обоих вариантах расположения окна до тех пор, пока фронт пламени не коснется стенок камеры (рис. 11). Далее графики расходятся так, что давление в камере при положении окна в поз. 3 все время будет больше, чем в поз. 1, т. е. $p_3(t) > p_1(t)$, что объясняется влиянием свойств истекающих газов. Однако фронт пламени при $p_3(t)$ достигает дальнего торца раньше, чем при $p_1(t)$, так как сказывается влияние сложения скоростей, после чего горение к моменту времени 180 мс прекращается, и камера начинает опорожняться.

В то же время при положении окна в поз. 1 движение фронта пламени происходит медленнее, горение продолжается даже после того, как оно прекратилось при положении окна в поз. 3, поэтому давление $p_1(t)$ продолжает расти и после того, как $p_3(t)$ уже начало падать. В результате более длительного горения максимальное значение $p_{1\max}(t)$ превышает $p_{3\max}(t)$. После касания правого торца фронт пламени при $p_1(t)$ начинает резко сокращаться, горение прекращается, и камера начинает опорожняться почти таким же темпом, как и при $p_3(t)$. Максимумы давления в обоих случаях имеют один и тот же механизм: при горении давление в камере нарастает, а после его прекращения — падает, формируя таким образом пик давления.

Динамика развития площадей фронтов пламени

Численная модель позволяет судить также о площади фронта пламени. При этом в ней принято, что толщина фронта пламени определена линейным

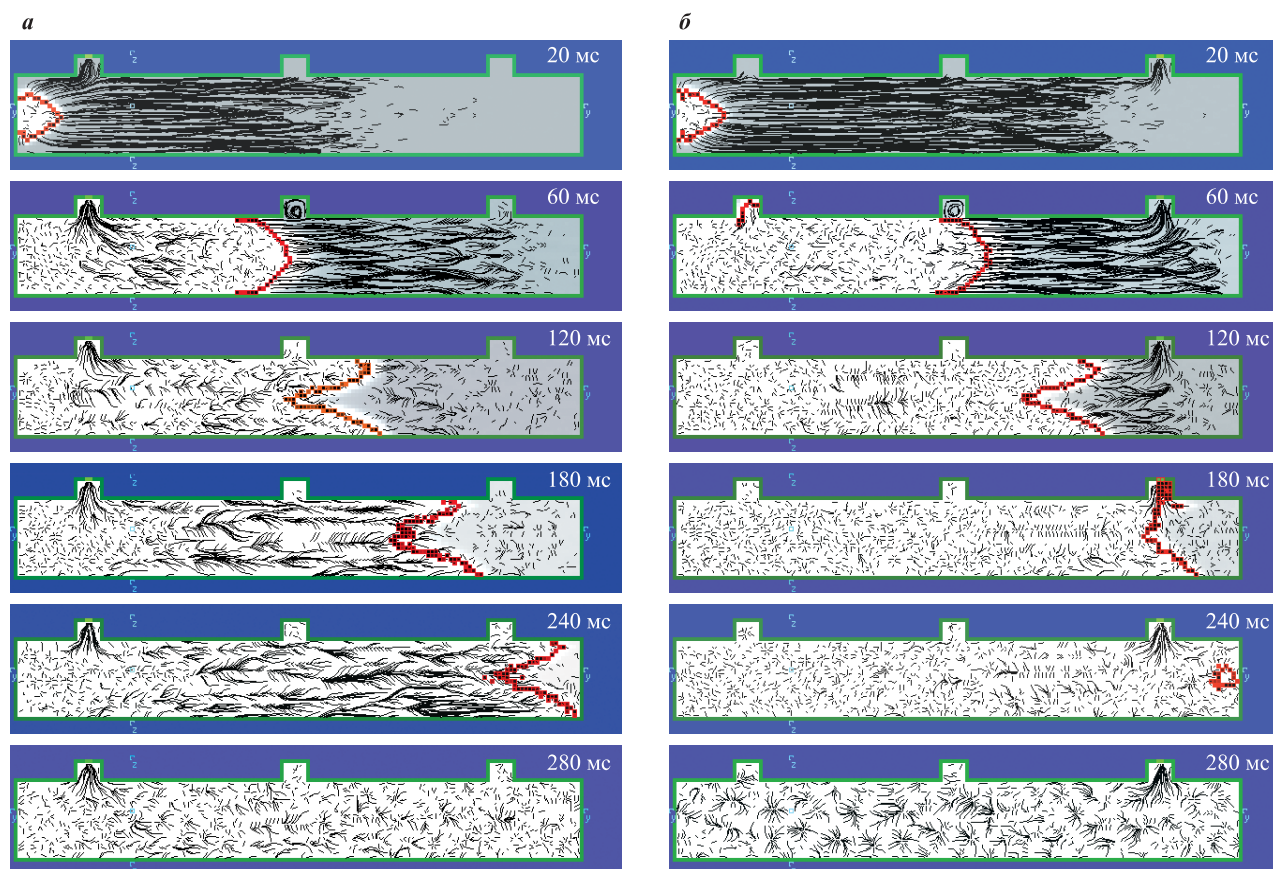


Рис. 10. Динамика развития фронта пламени при взрыве в камере с окном $d = 20$ мм у левого (а) и правого (б) торцов

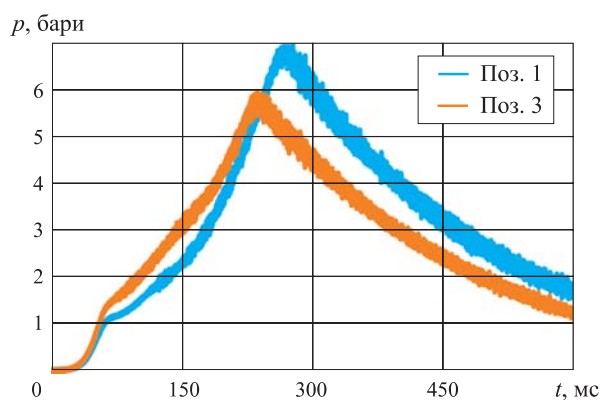


Рис. 11. Динамика развития давления при положении окна 20 мм в поз. 1 и 3

размером ячейки, а его площадь S (м^2) рассчитывается через площадь грани ячейки:

$$S = nS_1,$$

где n — число горящих ячеек;

S_1 — площадь грани расчетной ячейки, см^2 ; в нашем случае $S_1 = 1 \text{ см}^2$.

На рис. 12 сравнивается динамика развития площадей фронтов пламени, имевших место в каждом из четырех численных опытов. Из рис. 12 видно, что во всех случаях в начале развития фронта, до момента времени 5 мс, давление нарастает одинаково,

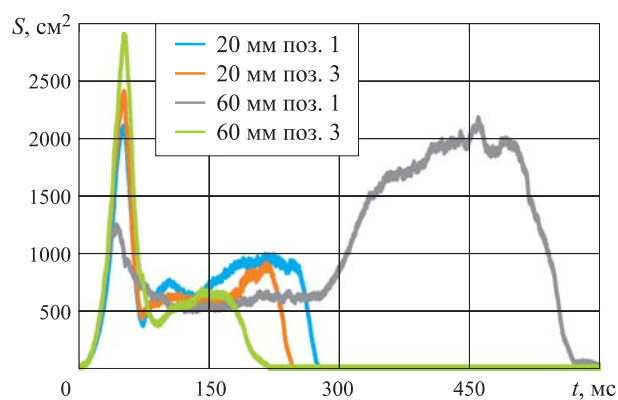


Рис. 12. Динамика развития площади фронта пламени при положении окна 20 и 60 мм в поз. 1 и 3

все графики совпадают, а далее начинают расходиться. Первой уменьшается площадь фронта при положении окна диаметром 60 мм в поз. 1. Это объясняется тем, что фронт пламени достигает окна и через него начинает истекать вместе с продуктами сгорания часть фронта пламени. В то же время пламя при положении окна диаметром 60 мм в поз. 3 достигает наибольшей площади. И наконец, малый размер окна слабо влияет на развитие фронта пламени, поэтому кривые, соответствующие положению окна как в поз. 1, так и в поз. 3, весьма близки между собой.

Наименьшая продолжительность взрыва, естественно, имеет место при установке окна диаметром 60 мм в поз. 1. Площадь горения во второй части процесса достаточно велика по сравнению с другими вариантами взрыва, но, с учетом того что при этом истекают продукты сгорания, давление в камере мало.

Видно, что при диаметре окна 20 мм кривые изменения площади фронта пламени близки между собой и недалеко от кривой для замкнутого объема. При диаметре окна 60 мм динамика развития фронта пламени при различных положениях окна существенно различается.

Вывод

На развитие процесса газового взрыва в камере, имеющей окно, оказывают влияние два важнейших фактора: размер окна и его положение относитель-

но места воспламенения. Ранее известное утверждение об их сочетанном действии на процесс трактовалось так: чем больше размер окна и меньше расстояние между ним и местом воспламенения газовой смеси, тем ниже максимальное давление взрыва. Однако оказывается, что верна только первая часть утверждения: чем больше размер окна, тем меньше давление взрыва. Что касается влияния местоположения окна на давление взрыва, то оно двоякое. При больших размерах окна остается верным известное утверждение, но при уменьшении его размеров влияние его положения нивелируется. Более того, оказывается, что при близком расположении окна к месту воспламенения давление даже несколько выше, чем при удаленном. Объяснение этому эффекту лежит в особенностях развития фронта пламени, его площади и скорости видимого движения.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Polandov Yu. Kh., Korolchenko A. Ya., Dobrikov S. A. Gas explosion in a room with a window and passage to an adjacent room // MATEC Web of Conferences. — 2016. — Vol. 86, Article No. 04031. — 7 p. DOI: 10.1051/mateconf/20168604031.
2. Поландов Ю. Х., Добриков С. А., Кукин Д. А. Результаты испытаний легкосбрасываемых конструкций // Пожаровзрывобезопасность/Fire and Explosion Safety. — 2017. — Т. 26, № 8. — С. 5–14. DOI: 10.18322/PVB.2017.26.08.5-14.
3. Bauwens C. R., Chaffee J., Dorofeev S. B. Effect of ignition location, vent size, and obstacles on vented explosion overpressures in propane-air mixtures // Combustion Science and Technology. — 2010. — Vol. 182, Issue 11-12. — P. 1915–1932. DOI: 10.1080/00102202.2010.497415.
4. Bauwens C. R. L., Bergthorson J. M., Dorofeev S. B. Experimental investigation of spherical-flame acceleration in lean hydrogen-air mixtures // International Journal of Hydrogen Energy. — 2017. — Vol. 42, Issue 11. — P. 7691–7697. DOI: 10.1016/j.ijhydene.2016.05.028.
5. Phylaktou H. N., Andrews G. E., Herath P. Fast flame speeds and rates of pressure rise in the initial period of gas explosions in large L/D cylindrical enclosures // Journal of Loss Prevention in the Process Industries. — 1990. — Vol. 3, Issue 4. — P. 355–364. DOI: 10.1016/0950-4230(90)80005-u.
6. Bi Mingshu, Dong Chengjie, Zhou Yihui. Numerical simulation of premixed methane-air deflagration in large L/D closed pipes // Applied Thermal Engineering. — 2012. — Vol. 40. — P. 337–342. DOI: 10.1016/j.applthermaleng.2012.01.065.
7. Chao J., Bauwens C. R., Dorofeev S. B. An analysis of peak overpressures in vented gaseous explosions // Proceedings of the Combustion Institute. — 2011. — Vol. 33, Issue 2. — P. 2367–2374. DOI: 10.1016/j.proci.2010.06.144.
8. Molkov V., Shentsov V. Numerical and physical requirements to simulation of gas release and dispersion in an enclosure with one vent // International Journal of Hydrogen Energy. — 2014. — Vol. 39, Issue 25. — P. 13328–13345. DOI: 10.1016/j.ijhydene.2014.06.154.
9. Fakandu B. M., Andrews G. E., Phylaktou H. N. Vent static burst pressure influences on explosion venting // Proceedings. Tenth International Symposium on Hazard, Prevention and Mitigation of Industrial Explosions (X ISHPMIE) (10–14 June 2014, Bergen, Norway). — 16 p. URL: <http://eprints.whiterose.ac.uk/104968/1/X%20ISHPMIE%20Paper%20150%20GEA%205.pdf> (дата обращения: 01.03.2019).
10. Zalosh R. G. Gas explosion tests in room-size vented enclosures // Proceedings of the 13th Loss Prevention Symposium. — Houston, 1979. — P. 98–108.
11. Поландов Ю. Х., Барз М. А., Власенко С. А. Моделирование процесса горения газозооушной смеси методом крупных частиц // Пожаровзрывобезопасность/Fire and Explosion Safety. — 2007. — Т. 16, № 3. — С. 6–9.

12. Комаров А. А., Бажина Е. В. Определение параметров динамических нагрузок от аварийных взрывов, действующих на здания и сооружения взрывоопасных производств // Вестник МГСУ. — 2013. — № 12. — С. 14–19.
13. Комаров А. А., Чиликина Г. В. Условия формирования взрывоопасных облаков в газифицированных жилых помещениях // Пожаровзрывобезопасность/Fire and Explosion Safety. — 2002. — Т. 11, № 4. — С. 24–28.
14. Мольков В. В., Некрасов В. П. Динамика сгорания газа в постоянном объеме при наличии истечения // Физика горения и взрыва. — 1981. — Т. 17, № 4. — С. 17–24.
15. Салымова Е. Ю. Динамика развития опасных факторов в зданиях с ограждающими конструкциями из трехслойных сэндвич-панелей при пожарах и взрывах : дис. ... канд. техн. наук. — М., 2015. — 110 с.
16. Li Jingde, Hernandez Francisco, Hao Hong, Fang Qin, Xiang Hengbo, Li Zhan, Zhang Xihong, Chen Li. Vented methane-air explosion overpressure calculation — A simplified approach based on CFD // Process Safety and Environmental Protection. — 2017. — Vol. 109. — P. 489–508. DOI: 10.1016/j.psep.2017.04.025.
17. Свидетельство об официальной регистрации программы для ЭВМ 2007614950 Российская Федерация. Моделирование процессов горения и взрыва газовоздушных смесей “Вулкан-М” / Поляндов Ю. Х., Барг М. А., Марков С. С. — № 2007613936, заявл. 08.10.2007, опубл. 03.12.2007.
18. Барг М. Численное и физическое моделирование взрывов газовых смесей. — Saarbrücken, Germany : LAP Lambert Academic Publishing, 2011. — 116 с.
19. Белоцерковский О. М., Давыдов Ю. М. Метод крупных частиц в газовой динамике. Вычислительный эксперимент. — М. : Наука, 1982. — 392 с.
20. Белоцерковский О. М., Давыдов Ю. М. Нестационарный метод “крупных частиц” для газодинамических расчетов // Журнал вычислительной математики и математической физики. — 1971. — Т. 11, № 1. — С. 182–207.
21. Численное исследование актуальных проблем машиностроения и механики сплошных и сыпучих сред методом крупных частиц : в 5 т. / Под ред. Ю. М. Давыдова. — М. : Национальная академия прикладных наук, 1995. — 1658 с.

Поступила 03.03.2019; после доработки 08.04.2019; принята к публикации 10.04.2019

Информация об авторах

Юрий Христофорович ПОЛЯНДОВ, д-р техн. наук, профессор, руководитель Научно-образовательного центра “Механика жидкости и газа, физика горения”, Орловский государственный университет им. И. С. Тургенева, г. Орел, Российская Федерация; ORCID: 0000-0003-2983-6023, e-mail: polandov@yandex.ru

Сергей Александрович ДОБРИКОВ, исследователь, Орловский государственный университет им. И. С. Тургенева, Россия, г. Орел, Российская Федерация; инженер-программист, ООО “МЕРА-НН”, г. Нижний Новгород, Российская Федерация; ORCID: 0000-0002-9339-1500, e-mail: dobrikov@yandex.ru

Effect of distance between ignition location and window on indoor gas explosion development

© Iurii Kh. Polandov^{1✉}, Sergey A. Dobrikov^{1, 2}

¹ Orel State University named after I. S. Turgenyev (Komsomolskaya St., 95, Orel, 302026, Russian Federation)

² MERA (Delovaya St., 13, Nizhniy Novgorod, 603163, Russian Federation)

ABSTRACT

Introduction. It has been previously known that for gas explosions in an unconfined chamber the following rule applies: the larger the distance between gas ignition location and relief opening (window), the higher the explosion pressure. This statement is based on results obtained by a number of researchers, including ourselves. However, as demonstrated by recent physical experiments, it is valid only for window sizes comparable to those recommended by guidelines to ensure certain safety conditions. For smaller window sizes, this relationship is leveled out or even changes its sign.

Research objective is to determine the cause of inversed relationship between distance from the window to ignition location and explosion pressure. Tackling this objective is of scientific and practical importance.

Research methods and tools. Two mathematical model variants for gas explosion development in an unconfined chamber were employed to study the revealed phenomenon, i. e. simplified model and numerical model. The first one, i. e. simplified model, is based on chamber representation as lumped volume, and using the Clapeyron equation in differential form. It was obtained that besides known factors, such as window size, properties of outflowing gases, etc., explosion development is influenced by the area of flame front and the time when it approaches the window. Unfortunately, this model does not take into account the dynamics of last factors development altogether. This task can be handled by the other model, numerical, implemented in Vulkan-M software. It is based on solving the gas dynamics equation system using large-particle method in Eulerian representation with added flame propagation conditions. Besides, Vulkan-M can visualize the physical process evolution, as well as record how its parameters and indicators develop.

Research results. It was found that if the window size is comparable to regulatory values, such a strong influence of window position on pressure is due not only to the difference of outflowing gas properties (initial mixture and combustion products), but also due to the fact that in the initial period of explosion development the flame front area is much larger for a further removed window than in case of a small distance between the window and ignition location. For a smaller window, the pressure increase rate in the initial period is high and almost identical for both explosion scenarios. Therefore, combustion time becomes decisive for the maximum pressure value. If the window is located far from the ignition, combustion time is shorter than in case of a smaller distance. As a result, maximum pressure in the second case is higher than in the first case. This explains the revealed phenomenon.

Conclusion. The larger the window size, the stronger it affects the explosion pressure. This influence is determined not only by gas outflow, but it intensifies, sometimes significantly, due to the influence on flame front development. If the window size is decreased, its influence on flame front development is weakened and becomes negligible. In this case, the explosion pressure is affected by combustion time, besides window size.

Keywords: deflagrational explosion, unconfined volume; explosion pressure; window size; window position; physical experiment; numerical experiment; flame front.

Acknowledgment. The authors acknowledge the support of Moscow State National Research University of Civil Engineering, Institute of Integrated Safety in Construction, in providing the facilities for carrying out physical experiments.

For citation: Iurii Kh. Polandov, Sergey A. Dobrikov. Effect of distance between ignition location and window on indoor gas explosion development. *Pozharovzrybobezopasnost/Fire and Explosion Safety*, 2019, vol. 28, no. 3, pp. 14–35. DOI: 10.18322/PVB.2019.28.03.14-35.

✉ Iurii Khristoforovich Polandov, e-mail: polandov@yandex.ru

Introduction

It is generally accepted, as well as proven by experiment, that for gas explosions* increasing the distance between gas mixture ignition location and relief opening, or pressure relief window (further referred to as window), results in pressure rise, including its maxi-

mum value $p_{\max}^{**}$. This result is widely known, and confirmed by us during tests in the chamber of 0.125 m³ in volume and 10 m³ with cubic shape [1, 2], as well as by our colleagues in the USA in a chamber of 63 m³ in volume [3], and by our British colleagues [4].

However, the most impressive results were obtained on the Serjant plant [5], equipped with a chamber having

* We consider a gas deflagrational explosion without flame-generated turbulence and resonant combustion.

** We assume the maximum pressure value for the explosion.

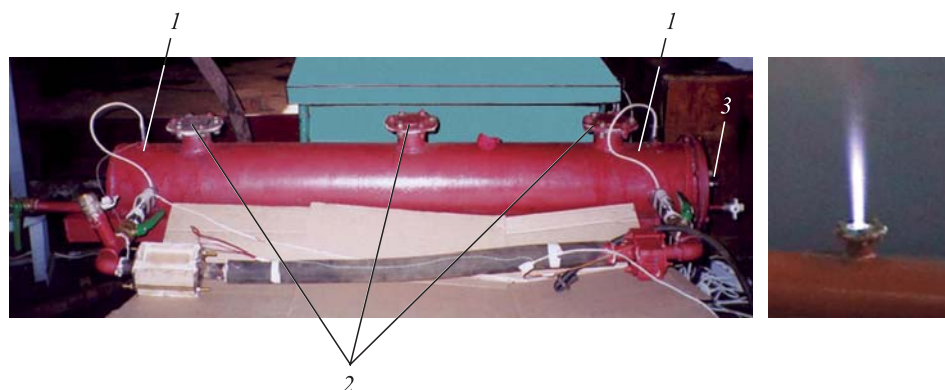


Fig. 1. General view of Serjant plant chamber and fragment of experimental explosion: 1 — pressure sensors; 2 — pressure relief windows; 3 — ignition device

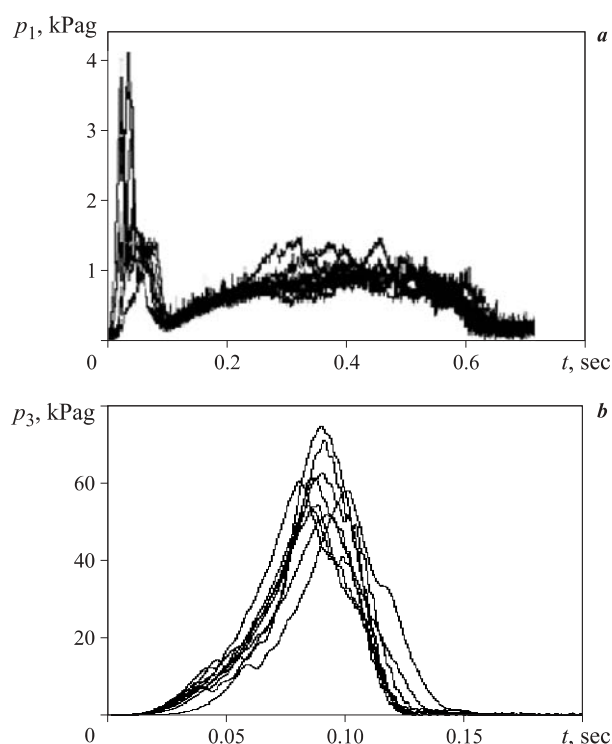


Fig. 2. Pressure course during explosions in a chamber with the window diameter of 60 mm in pos. 1 (a) and pos. 3 (b)

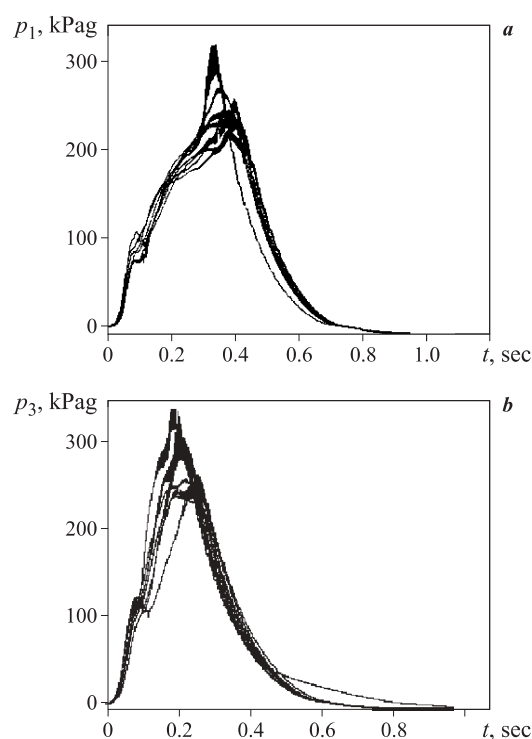


Fig. 3. Pressure course during explosions in a chamber with the window diameter of 20 mm in pos. 1 (a) and pos. 3 (b)

a length of $l = 1.5$ m and diameter of $d = 200$ mm (Fig. 1). This plant was used to study how window dimensions and position affect the explosion development. The chamber was filled by gas stoichiometric propane/air mixture. Research results are shown in Fig. 2 and 3 that provide combined data of 10 test runs for each of the variants. They demonstrate an acceptable level of results reproducibility which makes it possible to state that they are not random.

Further, it is assumed that in numerical experiments gas mixture is always ignited near the left flange*. Whereby, window location near this flange would be position 1, near the right flange it would be position 3, and in the chamber center — position 2. Correspondingly,

* In the physical experiment (see Fig. 1), ignition was initiated on the right-hand side.

we shall designate the course of pressure that develops during explosion in a room with the window located in position 1 as $p_1(t)$, and with the window located in position 3 as $p_3(t)$.

From Fig. 2 one can see that $p_{\max}$ values for explosions in chambers with the window diameter of 60 mm installed in positions 1 and 3 will differ by more than 10 times, i. e. $p_{3\max} > 10p_{1\max}$.

However, other results obtained using the same plant, demonstrate that for the window diameter of 20 mm the dependence of $p_{\max}$ on window position is inverted (see Fig. 3). Based upon the graphs in Fig. 2 and 3, one can see that, firstly, $p_3(t)$ pressure is significantly higher as compared to $p_1(t)$ (although it is evident, as the window size is reduced). Secondly, now $p_{3\max} < p_{1\max}$ (see Fig. 3), i. e. the sign of inequality is now in the opposite

direction. One should also note that pressure peaks have moved closer to each other: $p_{3\max}$ occurs earlier than $p_{1\max}$.

Hence, the objective has been set to identify why the influence of window location on gas explosion development is inverted if its dimensions are modified. Solving this objective is not only of scientific, but also of practical significance.

Working hypothesis

Obviously, in a confined space (no window) the window's influence on flame development is non-existent, while in a chamber with a window it is present. Hence, it is logical to formulate a premise that a larger window size produces a stronger influence on the explosion process. However, it is affected not only by the window size but also by other explosion development conditions. Primarily, this refers to the window position (including distance) relative to the gas mixture ignition location.

Still, it is impossible to explain the revealed phenomenon if only the window size and outflowing gas properties are known. Actually, even if one could interpret the deviation between $p_1(t)$ and $p_3(t)$ with explosions in a chamber with the window diameter of $d = 60$ mm as caused by the difference between initial mixture and combustion products properties, it is not possible for explosion results in a chamber with the window diameter of $d = 20$ mm, when $p_3(t)$ is greater than $p_1(t)$. It only remains to suppose that apart from window size and outflowing gas properties there are other factors that affect the explosion process. Their range can be determined by analyzing the mathematical models of explosion.

Simplified mathematical model

Due to the fact that the revealed dependence is primarily typical of cylindrically-shaped chambers with a high l/d ratio (which equals 7.5 for the Serjant plant), subsequent studies are conducted in this chamber.

Firstly, let us consider a widespread and in many ways simplified model of indoor explosion on the assumption that pressure is the same in all points of the room or, as certain authors refer, on the assumption of a quasi-static or quasi-stationary pressure in the room [5, 6]. It should be noted that these terms are ill-suited for this purpose, because they are already known in physics and mechanics and are used in a different context. At the same time, mechanics operates the notion of distributed and lumped parameters, such as mass. Similarly, in our case one could also refer to lumped volume, represent the chamber volume as a point and assign gas parameters to it. Besides the above-mentioned important assumption, we shall also assume that gas composition remains unchanged despite the chemical reaction that takes place during burning*, and that gas properties

are ideal. Then, the equation of state will be valid for the gas mixture in the chamber

$$pV = MRT_{av}, \quad (1)$$

where p is pressure, Pa;

V is the chamber volume, m^3 ;

M is the mass of gases involved in the process, kg;

$M = \text{const}$;

R is gas constant, $J/(kg \cdot K)$;

T_{av} is the mean temperature value of gases in the chamber, K.

Let us perform a differentiation of equation (1) on time. We shall also note that it is valid if the gas quantity remains unchanged (mass is the same), although, at first glance we are dealing with gases flowing out of the chamber, i. e. with variable mass. However, if we consider that the outflowing gas is essentially the volume's expansion and a part thereof, then the value of gas mass remains conditionally constant. It is worth mentioning that some authors believe that the explosion process and gas expansion in the chamber take place according to the adiabatic law [6, 7], whereas others agree that the explosion results in varying mass of gases present in the chamber [8]. In the first case, the authors' error stems from the fact that gas temperature increases not only adiabatically but also as a result of combustion, i. e. the explosion process is a polytropic one. The second case violates the rule of invariable mass of gases involved in the process. This is wrong because it precludes from using the equation of gas state.

Let us proceed to the differential form of equation (1):

$$\frac{dp}{dt} = -\frac{p}{V} \frac{dV}{dt} + \frac{MR}{V} \frac{dT_{av}}{dt}. \quad (2)$$

The first term on the right-hand side of equation (2) uses the derivative value to express the intensity of volume expansion and is obtained via volume flow:

$$dV/dt = F_0 w, \quad (3)$$

where F_0 is effective window area, m^2 ;

w is outflowing velocity, m/sec.

Three cases can be differentiated for gases outflow depending on chamber pressure. Outflowing velocity will be determined for these cases using the following formulas:

1) when $p \leq 0.2p_a$ (where p_a is atmospheric pressure, Pa), outflowing gas can be assumed as incompressible liquid:

$$w = \sqrt{2(p - p_a)/\rho_i}, \quad (3.1)$$

where $\rho_i = \rho_1$ is initial gas mixture density in the chamber, kg/m^3 ;

$\rho_i = \rho_2$ is combustion products density in the chamber, kg/m^3 ;

* The error introduced into the gas constant value is 3 % max.

2) when $0,2p_a < p < p_{cr}$ (where p_{cr} is the critical outflow pressure, MPa; $p_{cr} \approx 0.19$ MPa), subcritical outflow occurs:

$$w = \sqrt{\frac{2k}{k+1} \frac{p}{\rho_i} \left(1 - \frac{p_a}{p}\right)^{\frac{k-1}{k}}}, \quad (3.2)$$

where k is the adiabatic value; $k = C_p/C_v$; $k = 1.4$ for the initial mixture, $k = 1.25$ for combustion products;

the value of $2k/(k+1)$ ratio varies insignificantly: from 1.11 to 1.16 during combustion products and initial gas mixture outflow, correspondingly;

3) when $p \geq p_{cr}$, the outflow becomes critical:

$$w = \sqrt{\frac{2k}{k+1} \frac{p}{\rho_i}} = \beta \sqrt{\frac{p}{\rho_i}}, \quad (3.3)$$

where $\beta = \sqrt{2k/(k+1)}$ changes only slightly (between 0.64 and 0.68 during combustion products and initial gas mixture outflow, correspondingly).

Further. In the second term on the right-hand side of equation (2) the mean chamber temperature value T_{av} is defined as a weighted average due to the additivity of gas mixture properties:

$$\begin{aligned} T_{av} &= \frac{M_1 T_1 + M_2 T_2}{M} = \frac{(M - M_2) T_1 + M_2 T_2}{M} = \\ &= T_1 + \frac{M_2}{M} (T_2 - T_1), \end{aligned}$$

where M_1, M_2 is the mass of initial gas mixture and combustion products, correspondingly, kg;

T_1, T_2 is the temperature of initial gas mixture and combustion products, correspondingly, K.

Therefore, as T_1 and T_2 are the energy characteristic of this mixture, and their values are known:

$$T_2 - T_1 = q/C,$$

derivative value dT_{av}/dt will be determined as

$$\frac{dT_{av}}{dt} = \frac{T_2 - T_1}{M} \frac{dM_2}{dt} = \frac{q}{CM} \frac{dM_2}{dt},$$

where q is gas mixture calorific value, J/kg;

C is gas mixture specific heat capacity, J/(kg·K).

Let us take into consideration that $dM_2/dt = U_n F_f \rho_1$.

Then

$$\frac{dT_{av}}{dt} = \frac{q}{CM} U_n F_f \rho_1, \quad (4)$$

where U_n is normal combustion rate, m/sec;

F_f is flame front area, m².

By applying values from (3) and (4) to equation (2), we obtain:

$$\frac{dp}{dt} = -\frac{p}{V} w F_0 + \frac{MR}{V} \frac{q}{CM} U_n F_f \rho_1.$$

Let us rearrange this equation taking into account that

$$\rho_1 = \rho_{1a} (p/p_a)^{1/k},$$

then we obtain the final equation that connects the rate of pressure rise (or fall) to the critical process indicators:

$$\frac{dp}{dt} = -\frac{p}{V} w F_0 + \frac{R}{V} \frac{q}{C} \rho_{1a} \left(\frac{p}{p_a}\right)^{1/k} U_n F_f, \quad (5)$$

where ρ_{1a} is initial mixture density under normal pressure, kg/m³; $\rho_{1a} = 1.22$ kg/m³.

Calculation of maximum explosion pressure

Physical experiments demonstrate that, generally speaking, there are several scenarios when explosion pressure arrives at its peak value p_{max} (sometimes locally). Firstly, this occurs when $dp/dt = 0$, i. e. when summands in the right-hand side of equation (5) are equal; secondly, when the outflowing initial gas mixture is replaced by combustion products; thirdly, when the flame front area is abruptly changed (reduced).

Let us consider the first scenario, as it can be approached analytically, using equation (5). The other two variants when p_{max} maximum pressure occurs will be considered using specific examples in the analysis of numerical experiment results.

When the maximum pressure is calculated with the balanced right-hand side of equation (5), the expression for critical outflow is relatively simple ($p = p_{max}$ with the known value of k):

$$\frac{p_{max}}{V} \beta \sqrt{\frac{p_{max}}{\rho_i}} p_{max}^{-1/k} F_0 = \frac{R}{V} \frac{q}{C} \rho_{1a} p_a^{-1/k} U_n F_f, \quad (6)$$

whence

$$p_{max} = \left[\left(\frac{F_f}{F_0} \frac{Rq}{C\beta} \rho_{1a} U_n \right) p_a^{-1/k} \rho_i^{0.5} \right]^{\frac{k}{1.5k-1}}. \quad (7)$$

With $k = 1.4$

$$p_{max} \cong \left(\frac{F_f}{F_0} \frac{Rq}{C\beta} \rho_{1a} U_n \right)^{1.27} p_a^{-0.91} \rho_i^{0.635}. \quad (8)$$

According to this relationship, decrease in outflowing gas mixture density from 1.22 to 0.17 kg/m³ (after combustion) can result in the maximum chamber pressure dropping by 3.5 times. However, this is true only when other conditions of explosion development are identical for the cases being compared. This is hardly possible as change in one parameter leads to changes in other parameters.

One can also raise another question: if, with other things equal, but with different outflowing gas temperatures, the chamber pressure is still the same, then what should the ratio of flame front dimensions be in both cases? From equation (8) it follows that $F_{f1}/F_{f2} = (\rho_2/\rho_1)^{0.5}$, hence in our case we obtain the ratio $F_{f2} = 2.65 F_{f1}$.

As far as subcritical outflow scenarios are concerned, the relationship $w = w(\rho_i)$ assumes a more complex form in these variants, hence its solution is not given here. In principle, it is sufficient to analyze formulas (3.1)–(3.3) that express the outflowing velocity. All of them include the outflowing gas density in the form of factor $\rho_i^{-0.5}$, hence a relationship similar to (7) is to be expected. Obviously, one should treat formula (7) as an approximation, as many indicators it includes vary during the explosion process, albeit slightly. Unfortunately, conditions that allow to apply this formula, are rarely met.

On factors that affect flame front development

The influence of flame front area F_f on explosion development according to formula (5) is evident, hence researchers give sufficient attention to this matter. Speaking about the dynamics of this critical parameter, we shall note that flame-generated turbulence is not taken into account in line with the assumption made. Moreover, based on numerical experiment results it is not observed in the chamber of Serjant plant. The notion of how laminar flame develops is well known. Visible flame front is formed due to its movement with the speed determined by three processes: combustion itself, gas expansion during heating, and gas flow movement towards the window in order to be discharged.

Firstly, as early as in the 19th century, since the time of Russian scientist V. A. Mikhelson, it has been known

that for laminar flame the vector of combustion velocity in gas is directed normally towards the front surface. Propagation rate is typically a few tens of centimeters per second. In our case, for propane/air mixture it is between 0.38 and 0.42 m/sec.

Secondly, gas expands in the combustion area, and contracts outside this area on both sides of it. This results in movement of gases away from the combustion area, including movement of flame front. Front velocity modulus is the higher, the larger the volume of gas layer located on the side that this vector is directed to. This process is clearly observed during numerical gas explosion modeling in the confined chamber of Serjant plant. It is especially typical of the initial time of explosion development (Fig. 4). One can see from the figure that along the chamber axis front velocity assumes a value larger than velocity towards the chamber wall, forming a well-known semi-elliptical shape of flame.

Thirdly, gas outflow also affects the flame shape. It is known that gas flow in a cylindrical volume under laminar conditions has a velocity profile resembling a semi-ellipsoid elongated in the discharge direction.

In a gas explosion, all of these velocity vectors are combined according to the superposition principle.

Gas explosion numerical modeling

A feature of describing gas explosions by means of numerical methods is that they provide a possibility to calculate gas parameters when distributed over volume. This provides for tracking not only pressure and temperature variations in all computation cells which the volume is divided into, but also flow velocity and flow paths. Besides, by modeling flame propagation conditions from cell to cell, it is possible to observe the development of flame front, a fundamental parameter that defines how an explosion evolves. For this purpose, we revert to numerical explosion modeling in the Serjant plant chamber. It was completed according to the input data, using the domestically produced Vulkan-M software [9, 10] developed on the basis of large-particle method [11].

Explosion modeling in Serjant plant confined volume

To analyze numerical modeling results, it is practicable to take into account the outcomes of gas explosion calculation performed on the Serjant plant with the confined chamber volume. This numerical experiment with flame front visualization acts as a homing experiment. It may also be assumed as a control experiment in terms of evaluating the performance of Vulkan-M software tool. The process inside a chamber filled with gas mixture of stoichiometric composition is being modeled. Mixture ignition occurs on the left of flange with reference to the chamber centerline. Trial results are

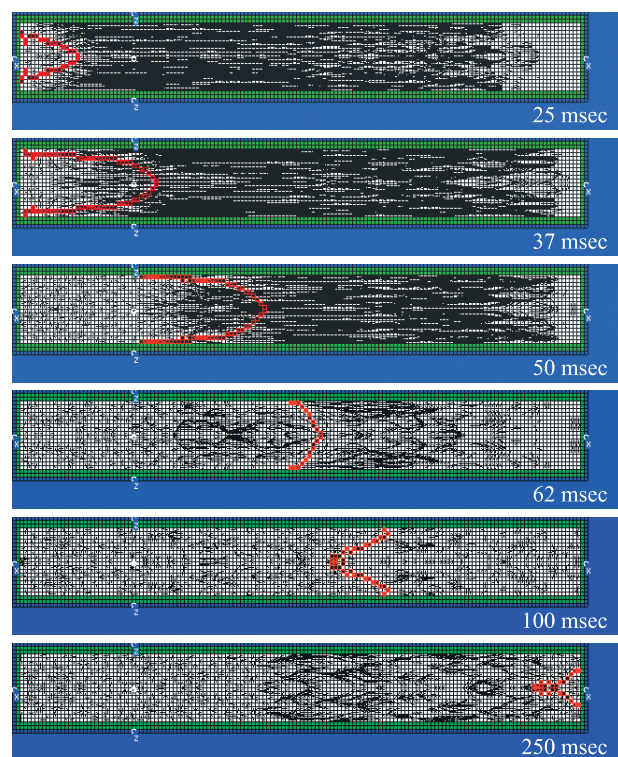


Fig. 4. Explosion in Serjant plant confined volume

given in Fig. 4–6. The computational volume is divided into approximately 50,000 cells of cubic shape with the edge length of 1 cm. Flame front is represented by burning cells shown in red color. Fig. 4 illustrated a typical pattern of front development. At first, it rapidly expands into a semi-ellipsoidal shape. As a result, it acquires maximum area. Then, having grown to half the volume, it degrades into a plane. This is explained by the fact that in this case the chamber space on both sides of the flame front, where compression occurs, has the same dimensions. As a result, their elasticity is identical. In the second half of the volume the front acquires a shape that is for some reason referred to as “tulip”, although it more likely resembles a funnel, whose drain channel is directed towards the combustion products side. Visible front traveling speed is much slower in this part: it needs 60 msec to travel the first part, while 200 msec are needed for the second part.

Pressure and flame front area calculation results are given in Fig. 5. The figure demonstrates that the front area reaches its maximum value in 50 msec. This is in line with “visual” data shown in Fig. 4. While the flame front is moving in the first part of the volume, the pressure increases at a very high rate. As it approaches the middle, it is falling fast. This is due to the fact that initial gas mixture volume is compressed the more inten-

sively, the larger its volume and the lower the chamber pressure, as $dV/dp = -V/(kP)$. This is characteristic of the primary stage of flame front development. From Fig. 6 one can see that the flame front area at point 50 msec starts decreasing after touching the chamber walls, as the flame does not spread in the radial direction. At point 75 msec, the front crosses the chamber middle line. Data shown in Fig. 5 and 6 clarify the video frames on Fig. 4.

Explosion in Serjant plant with the window diameter of 60 mm

Fig. 7 and 8 demonstrate numerical experiment results of gas explosions in a chamber with Serjant-type geometry. Experiments were carried out with the window successively located in two points — near ignition location (position 1) and on the opposite side (position 3). Fig. 9 shows the behavior of pressure curve $p_1(t)$ with the window in position 1 and $p_3(t)$ with the window in position 3. Let us compare them with the results of physical experiments (see Fig. 2). Performance of a mathematical model is confirmed not only by the qualitative agreement on numerical and physical experiment results, but to a large extent by their quantitative concurrence. It is clear that not only is the process duration almost identical, but the behavior of curves in general is very closely matched. Thus, we can quite safely accept the data obtained in the numerical experiment on flame front development and use them for analysis (see Fig. 7 and 8).

Window position 1. As shown in Fig. 7, after touching the chamber wall, the flame front very quickly reaches the window. Combustion products are also discharged, hence initial mixture is finally combusted in the window and outside the chamber. Due to this fact and to almost identical velocities which the front travels with to the right side (by compressing the unburnt part of the mixture) and to the left side (due to the velocity of gases rushing towards the window), front position and size somewhat stabilize and remain practically unchanged up to $t = 200$ msec. At this time the front area remains as small as possible, i. e. close to the chamber cross-section area.

At the lapse of 200 msec the front detaches from the window and slowly moves to the right, growing in area, that achieves its maximum value at point $t = 450$ msec. The front area decreases when it touches the right end.

As shown in Fig. 9a, pressure $p_1(t)$ has two peak values. The first one is produced due to intense flame front expansion, typical for the initial stage of its propagation, that results in the growth of chamber pressure. Then, when the front simultaneously reaches the chamber walls and window, combustion products along with a part of the flame start discharging through the front. As a result, pressure drops abruptly. The second peak is also related to a variation in flame front

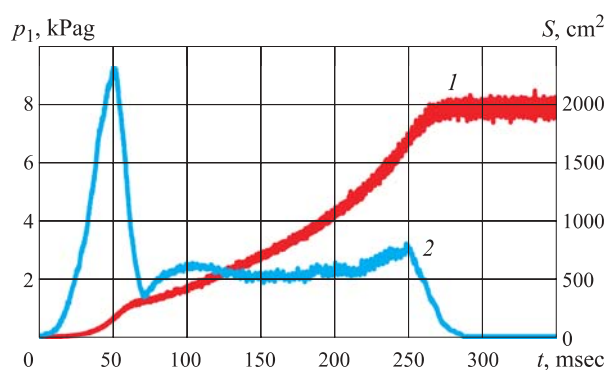


Fig. 5. Dynamics of pressure and flame front area development for a confined volume explosion

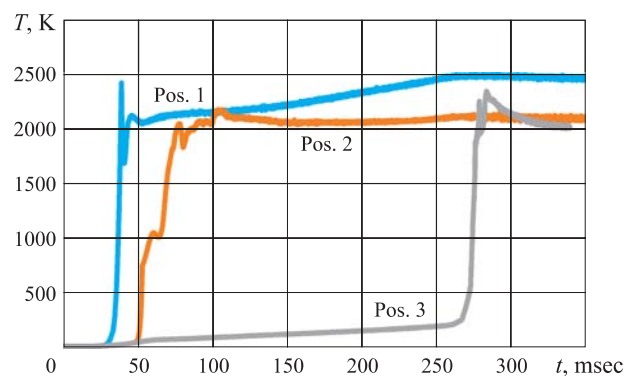


Fig. 6. Dynamics of gas temperature for a confined volume explosion: “sensors” at the left flange (pos. 1), in the chamber middle (pos. 2) and at the right flange (pos. 3)

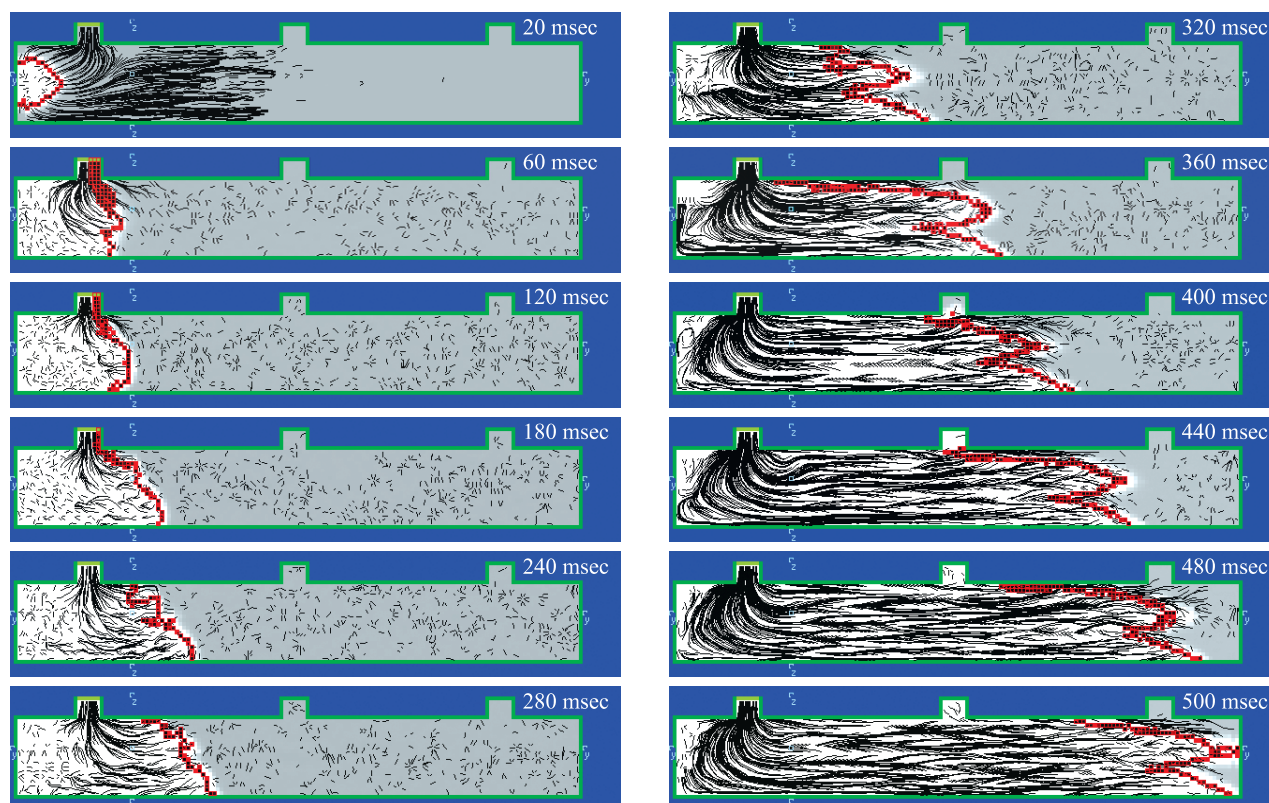


Fig. 7. Flame front development dynamics with the window of $d = 60$ mm in pos. 1

area. In this case, the area is growing within the time interval of 250 to 500 msec. Having reached its peak, it decreases (see Fig. 7 and Fig. 12 further).

Window position 3. In this case, the pattern of flame front development is completely different (see Fig. 8). Here, velocities of combustion, gas compression and gas mixture flow movement towards the window are combined. As a result, the flame front that initially has an ellipsoidal shape, is strongly elongated and drawn to the window which the initial mixture is flowing through. Despite the fact that it flows at a lower speed than com-

bustion products do, the front moves towards the window very rapidly, and it reaches the window in 80 msec. After that the front velocity slows down, and it takes the same 80 msec to cover the final 10 % of space. At this time, the pattern of flame front development represented in Fig. 7 for the initial period is repeated. This observation is further confirmed by the graph in Fig. 12.

In Fig. 9b, it is evident that pressure $p_3(t)$ increases up to point 70 msec; in this period of time the initial mixture is outflowing. After combustion products are discharged through the window, pressure drops and it is

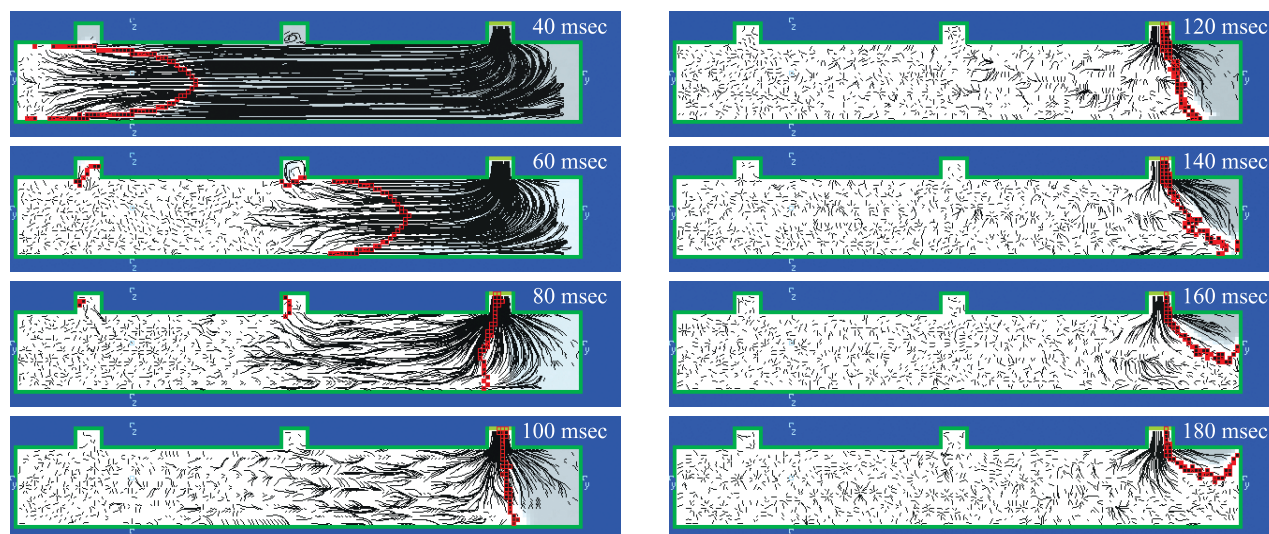


Fig. 8. Flame front development dynamics with the window of $d = 60$ mm in pos. 3

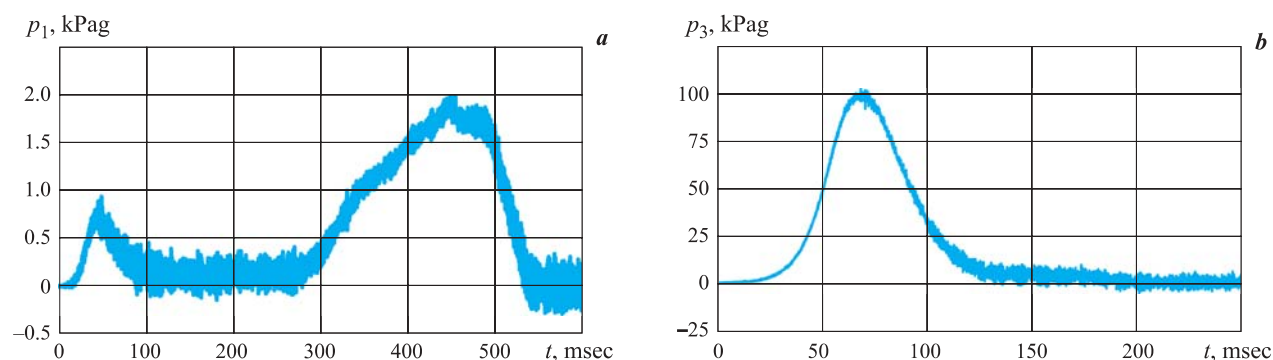


Fig. 9. Dynamics of pressure development with the window of $d = 60$ mm in pos. 1 (a) and pos. 3 (b)

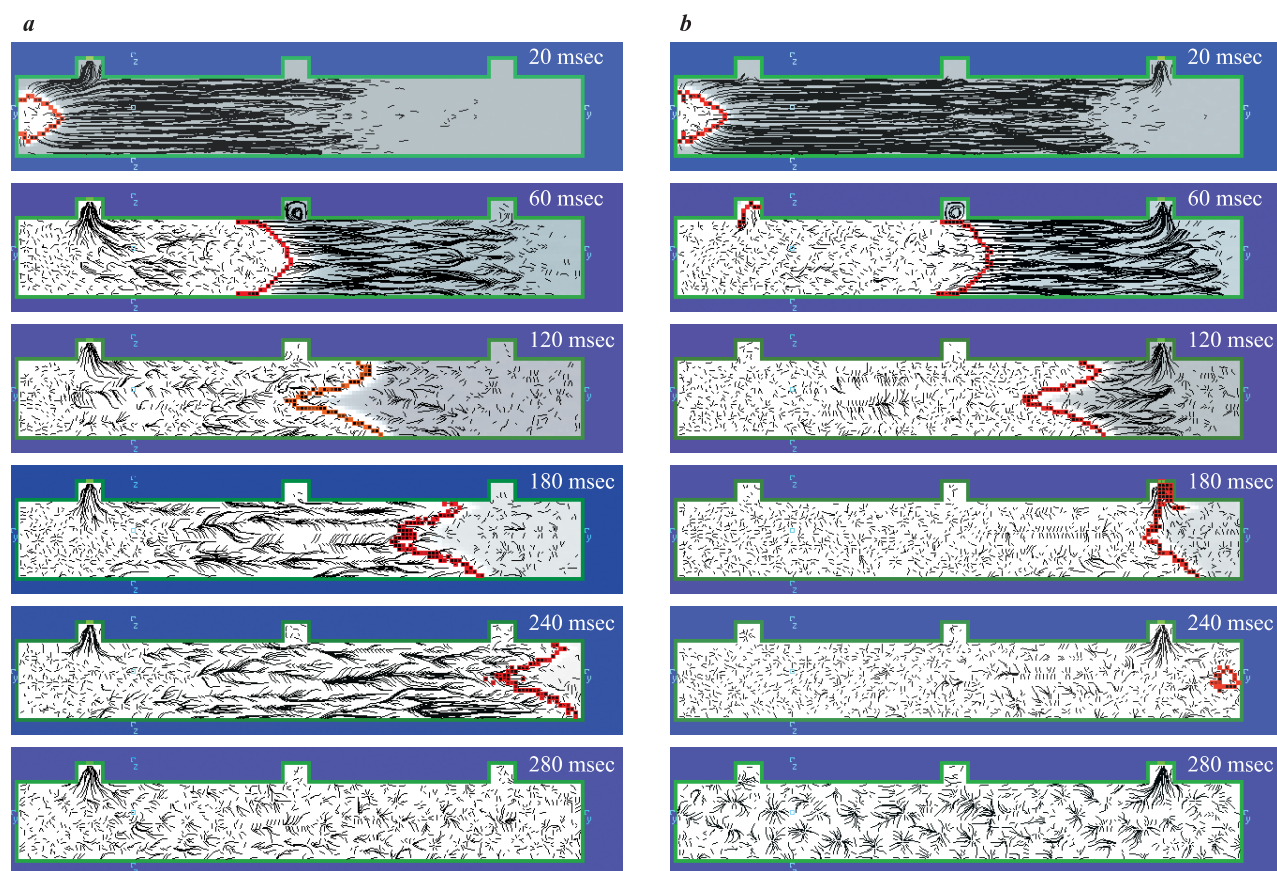


Fig. 10. Dynamics of flame front development for explosion in the chamber with the window of $d = 20$ mm near left end (a) and right end (b)

almost equal to zero within the time period of 120 to 180 msec. In this case, the duration of explosive process is much less than in the first case. The mathematical model demonstrates that in the scenario with the window positioned near the ignition location the initial mixture is combusted almost completely. However, when the window is positioned at the far flange, more than 90 % of initial mixture is discharged from the chamber.

Explosion in Serjant plant with the window diameter of 20 mm

Reducing window diameter to 20 mm results in a qualitative change in the way it affects the explosive

process (Fig. 11). With the smaller window size, the pattern of flame front development becomes closer to its behavior in a confined chamber. This is noticeable when comparing the frames in Fig. 10 and 4 to each other. This is also demonstrated by how close the process duration values are for window positions 1 and 3 (see Fig. 12).

Pressure in the chamber grows in the same manner with both window position options until the flame front touches the chamber walls. After that the graphs diverge, so that chamber pressure with the window position 1 will always be higher than with position 3, i. e. $p_3(t) > p_1(t)$, which is explained by the influence of outflowing gas properties. However, at $p_3(t)$ the flame front

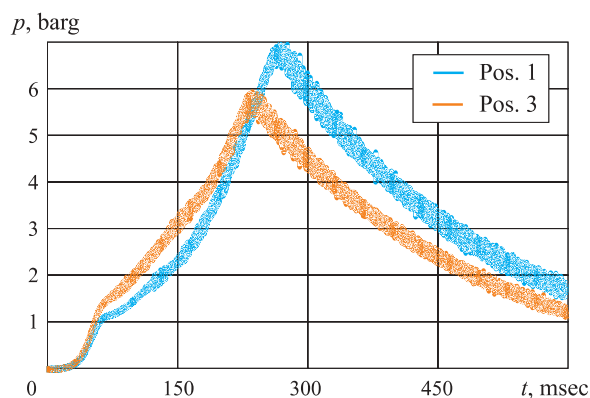


Fig. 11. Dynamics of pressure development with the window of 20 mm in pos. 1 and pos. 3

reaches the far end earlier than at $p_1(t)$, as the effect of velocities combination is manifested. By the point of 180 msec combustion stops and the chamber starts emptying.

At the same time, with the window in position 1, the flame front moves at a slower speed. Combustion continues even after it has completely stopped in the case with window position 3. Hence, pressure $p_1(t)$ continues to grow after $p_3(t)$ has already started falling. As a result of a longer combustion time, maximum value $p_{1\max}(t)$ is greater than $p_{3\max}(t)$. Having touched the right end, the flame front at $p_1(t)$ starts abruptly contracting. Combustion stops and the chamber starts emptying at almost the same rate as in scenario with $p_3(t)$. Pressure maximums are produced in the same manner in both cases: pressure in the chamber grows during combustion and falls after it has stopped, thus forming a pressure peak.

Dynamics of flame front areas development

The numerical model also provides for assessment of flame front area. The model assumes that flame front thickness is defined by the linear cell dimension, while its area S (m²) is calculated based on the cell edge area. Then

$$S = n S_1,$$

where n is the number of burning cells;

S_1 is the edge area of a computational cell, cm²;
in our case $S_1 = 1$ cm².

Fig. 12 compares the dynamics of flame front areas development occurring in each of the four above-mentioned experiments. From Fig. 12, one can see that in all scenarios at the beginning of front development (up to the time point 5 msec) pressure rise occurs in the same manner. All graphs concur, but further they start to separate. The first one to decrease is the front area with the window diameter of 60 mm located in position 1. This is due to the fact that the flame front reaches the window and a part of the flame front starts

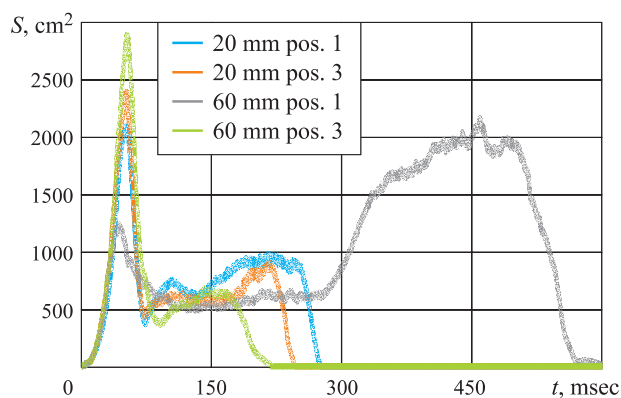


Fig. 12. Dynamics of flame front development with the window of 20 mm and 60 mm in pos. 1 and pos. 3

flowing out through the window along with combustion products. At the same time, flame with the window diameter of 60 mm in position 3 acquires maximum area. Finally, a small window size has little effect on flame front development. Therefore, the curves that correspond to window position 1 and position 3 are very close to each other.

The least explosion duration naturally occurs with the window diameter of 60 mm located in position 1. Combustion area in the second part of the process is fairly large as compared to other explosion scenarios. However, due to the fact that combustion products are discharged in this case, the chamber pressure is low.

It is evident that with the window diameter of 20 mm the curves of flame front area behavior are close to each other and approach the confined volume curve. With the window diameter of 60 mm, dynamics of flame front development is fundamentally different for different window positions.

Conclusion

Two critically important factors affect how a gas explosion develops in a chamber with a window. They are: window size and its position relative to the ignition location. Previously their combined effect on the process has been interpreted as follows: the larger the window size and the smaller the distance between the window and gas mixture ignition location, the lower the maximum explosion pressure. However, only the first part of the statement proves to be valid: the larger the window size, the lower the explosion pressure. As far as the effect of window location on explosion pressure is concerned, it is ambivalent. For larger window sizes, this well-known statement remains true, but reducing its size results in leveling out its location effect. Moreover, it turns out that with the window position located close to the ignition point, the pressure is even slightly higher than with a window positioned remotely. The explanation of this phenomenon lies in the specifics of flame front development, its area and visible movement velocity.

REFERENCES

1. Yu. Kh. Polandov, A. Ya. Korolchenko, S. A. Dobrikov. Gas explosion in a room with a window and passage to an adjacent room. *MATEC Web of Conferences*, 2016, vol. 86, article no. 04031, 7 p. DOI: 10.1051/mateconf/20168604031.
2. Yu. Kh. Polandov, S. A. Dobrikov, D. A. Kukin. Results of tests pressure-relief panels. *Pozharovzryvbezopasnost/Fire and Explosion Safety*, 2017, vol. 26, no. 8, pp. 5–14 (in Russian). DOI: 10.18322/PVB.2017.26.08.5-14.
3. C. R. Bauwens, J. Chaffee, S. B. Dorofeev. Effect of ignition location, vent size, and obstacles on vented explosion overpressures in propane–air mixtures. *Combustion Science and Technology*, 2010, vol. 182, issue 11–12, pp. 1915–1932. DOI: 10.1080/00102202.2010.497415.
4. C. R. L. Bauwens, J. M. Bergthorson, S. B. Dorofeev. Experimental investigation of spherical-flame acceleration in lean hydrogen–air mixtures. *International Journal of Hydrogen Energy*, 2017, vol. 42, issue 11, pp. 7691–7697. DOI: 10.1016/j.ijhydene.2016.05.028.
5. H. N. Phylaktou, G. E. Andrews, P. Herath. Fast flame speeds and rates of pressure rise in the initial period of gas explosions in large L/D cylindrical enclosures. *Journal of Loss Prevention in the Process Industries*, 1990, vol. 3, issue 4, pp. 355–364. DOI: 10.1016/0950-4230(90)80005-u.
6. Mingshu Bi, Chengjie Dong, Yihui Zhou. Numerical simulation of premixed methane–air deflagration in large L/D closed pipes. *Applied Thermal Engineering*, 2012, vol. 40, pp. 337–342. DOI: 10.1016/j.applthermaleng.2012.01.065.
7. J. Chao, C. R. Bauwens, S. B. Dorofeev. An analysis of peak overpressures in vented gaseous explosions. *Proceedings of the Combustion Institute*, 2011, vol. 33, issue 2, pp. 2367–2374. DOI: 10.1016/j.proci.2010.06.144.
8. V. Molkov, V. Shentsov. Numerical and physical requirements to simulation of gas release and dispersion in an enclosure with one vent. *International Journal of Hydrogen Energy*, 2014, vol. 39, issue 25, pp. 13328–13345. DOI: 10.1016/j.ijhydene.2014.06.154.
9. B. M. Fakandu, G. E. Andrews, H. N. Phylaktou. Vent static burst pressure influences on explosion venting. In: *Proceedings. Tenth International Symposium on Hazard, Prevention and Mitigation of Industrial Explosions (XISHPMIE) (10–14 June 2014, Bergen, Norway)*. 16 p. Available at: <http://ep-rints.whiterose.ac.uk/104968/1/X%20ISHPMIE%20Paper%20150%20GEA%205.pdf> (Accessed 1 March 2019).
10. R. G. Zalosh. Gas explosion tests in room-size vented enclosures. In: *Proceedings of the 13th Loss Prevention Symposium*. Houston, 1979, pp. 98–108.
11. Yu. Kh. Polandov, M. A. Barg, S. A. Vlasenko. Simulation of combustion of gas–air mixture by the method of large particles. *Pozharovzryvbezopasnost/Fire and Explosion Safety*, 2007, vol. 16, no. 3, pp. 6–9 (in Russian).
12. A. A. Komarov, E. V. Bazhina. Determining the dynamic load caused by accidental explosions affecting buildings and structures of hazardous areas. *Vestnik MGSU / Proceedings of Moscow State University of Civil Engineering*, 2013, no. 12, pp. 14–19 (in Russian).
13. A. A. Komarov, G. V. Chilikina. Conditions of explosive mixture formation in residential houses with gas heating systems. *Pozharovzryvbezopasnost/Fire and Explosion Safety*, 2002, vol. 11, no. 4, pp. 24–28 (in Russian).
14. V. V. Mol'kov, V. P. Nekrasov. Dynamics of gas combustion in a constant volume in the presence of exhaust. *Combustion, Explosion, and Shock Waves*, 1982, vol. 17, issue 4, pp. 363–369. DOI: 10.1007/bf00761201.
15. E. Yu. Salymova. *Dynamics of development of dangerous factors in buildings with enclosing structures made of sandwich panels in fires and explosions*. Cand. Sci. (Eng.) Diss. Moscow, 2014. 110 p. (in Russian).
16. Jingde Li, Francisco Hernandez, Hong Hao, Qin Fang, Hengbo Xiang, Zhan Li, Xihong Zhang, Li Chen. Vented methane–air explosion overpressure calculation — A simplified approach based on CFD. *Process Safety and Environmental Protection*, 2017, vol. 109, pp. 489–508. DOI: 10.1016/j.psep.2017.04.025.
17. Yu. Kh. Polandov, M. A. Barg, S. S. Markov. *Modeling of processes of burning and explosion of the gas mixes "Vulcan-M"*. Certificate of state registration of the computer program RU, no. 2007614950, publ. date 3 December 2007 (in Russian).
18. M. Barg. *Chislennoye i fizicheskoye modelirovaniye vzryvov gazovykh smesey* [Numerical and physical modeling of gas mixture explosions]. Saarbrücken, Germany, LAP Lambert Academic Publishing, 2011. 116 p. (in Russian).

19. O. M. Belotserkovskiy, Yu. M. Davydov. *Metod krupnykh chastits v gazovoy dinamike. Vychislitelnyy eksperiment* [The method of large particles in gas dynamics. Computational experiment]. Moscow, Nauka Publ., 1982. 392 p. (in Russian).
20. O. M. Belotserkovskii, Yu. M. Davydov. A non-stationary “Coarse particle” method for gas-dynamical computations. *USSR Computational Mathematics and Mathematical Physics*, 1971, vol. 11, no. 1, pp. 241–271. DOI: 10.1016/0041-5553(71)90112-1.
21. Yu. M. Davydov (ed.). *Chislennoye issledovaniye aktualnykh problem mashinostroyeniya i mekhaniki sploshnykh i sypuchikh sred metodom krupnykh chastits* [Numerical study of actual problems of mechanical engineering and mechanics of solid and granular media by the method of large particles]. Moscow, National Academy of Applied Sciences Publ., 1995. 1658 p. (in Russian).

Received 3 March 2019; received in revised form 8 April 2019; accepted 10 April 2019

Information about the authors

Iurii Kh. POLANDOV, Dr. Sci. (Eng.), Professor, Head of Scientific-Educational Center “Fluid Mechanics. Combustion”, Orel State University named after I. S. Turgenev, Orel, Russian Federation; ORCID: 0000-0003-2983-6023, e-mail: polandov@yandex.ru

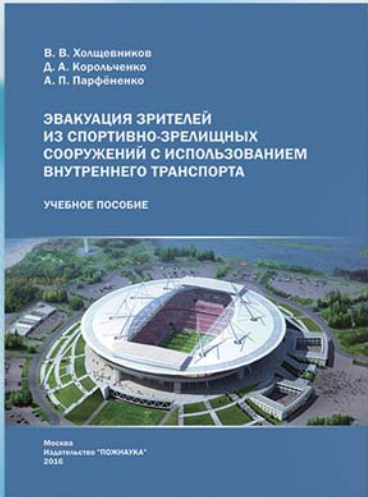
Sergey A. DOBRIKOV, Researcher, Orel State University named after I. S. Turgenev, Orel, Russian Federation; Software Designer, MERA, Nizhniy Novgorod, Russian Federation; ORCID: 0000-0002-9339-1500, e-mail: dobrikov@yandex.ru



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.2019.28.03.36-49>

УДК 519.8

Моделирование уровня риска решений, принимаемых при управлении ликвидацией пожаров

© В. Я. Вилисов¹✉

¹ Технологический университет (Россия, 141070, Московская обл., г. Королёв, ул. Гагарина, 42)

РЕЗЮМЕ

Введение. Системы поддержки принятия решений при управлении пожаротушением позволяют снизить прямой материальный ущерб, количество погибших и пострадавших. Работа посвящена построению модели риска, заключенного в решениях, принятых руководителем тушения пожара (РТП) как лицом, принимающим решения (ЛПР), в контексте управления тушением пожара в многоэтажном здании.

Цели и задачи. Целью исследования является построение модели, отражающей уровень риска в решениях, принимаемых РТП. Для достижения цели необходимо решить следующие задачи: 1) выбрать тип модели принятия решений; 2) построить алгоритм оценивания параметров модели по наблюдениям за решениями, принятыми РТП; 3) проанализировать качество модели.

Методы. Выбран класс моделей принятия решений, называемых играми с природой. Процедура принятия решений ЛПР при тушении пожара в многоэтажном здании представлена в виде трехуровневого дерева решений. Оно преобразовано в нормальную (табличную) форму, что позволило представить выбор решений в виде критерия Гурвица. Параметр пессимизма-оптимизма Гурвица отражает степень риска в решениях ЛПР. Для проверки работоспособности предложенной технологии оценивания параметра Гурвица выполнено имитационное моделирование.

Результаты и их обсуждение. Имитационные эксперименты подтвердили работоспособность предложенной технологии оценивания степени склонности ЛПР к риску. Оценки, построенные для разных ЛПР, позволяют сравнивать степень склонности к риску различных РТП. Это дает возможность построить эталонные оценки по данным о принятии решений опытными РТП. Оценки других РТП можно сравнивать с эталонными и делать выводы о качестве их управления.

Выводы. Цель исследования достигнута путем решения поставленных задач. Предложенная технология является разновидностью машинного обучения, представляется перспективной и может быть использована в составе систем поддержки принятия решений РТП, а также при обучении и подготовке персонала, занимающегося управлением в чрезвычайных ситуациях.

Ключевые слова: дерево решений; игры с природой; критерий Гурвица; лицо, принимающее решения; обратная задача; оценивание.

Для цитирования: Вилисов В. Я. Моделирование уровня риска решений, принимаемых при управлении ликвидацией пожаров // Пожаровзрывобезопасность/Fire and Explosion Safety. — 2019. — Т. 28, № 3. — С. 36–49. DOI: 10.18322/PVB.2019.28.03.36-49.

✉ Вилисов Валерий Яковлевич, e-mail: vilisov@ut-mo.ru

Modeling the level of risk of decisions accepted at management fire elimination

© Valeriy Ya. Vilisov¹✉

¹ Technological University (Gagarina St., 42, Korolyev, Moscow Region, 141070, Russian Federation)

ABSTRACT

Introduction. Systems of decision-making support, which are applied when managing fire-extinguishing operations, allow reducing direct financial damage and number of dead and wounded. The work in question is devoted to the construction of the risk model based on the decisions taken by the Fire Ground Commander (FGC) being the Decision Maker (DM) in the context of extinguishing the fire in a multi-storey building.

Aims and problems. The objective of the research is the construction of a model that would demonstrate the risk level contained in the decisions of the FGC. In order to achieve the objective it is necessary to solve the following problems: 1) to choose the type of a decision taking model; 2) to build the algorithm of model parameter estimation using the decisions taken by the FGC; 3) to analyze the model's quality.

Methods. The model class called Nature Games has been chosen. The procedure of DM's decision taking process observed while extinguishing the fire in a multi-storey building has been presented as a three-level decision tree. It was transformed into a normal (table) form, thus presenting the decision choice as the Hurwitz Criterion. Hurwitz's parameter of pessimism/optimism demonstrates the risk level contained in the DM's decisions. Simulation modelling has been performed in order to check the working capacity of the suggested Hurwitz parameter estimation technology.

Results and discussion. Simulation experiments proved the working capacity of the suggested technology on assessing the DM's degree of risk proneness. The estimates that have been built for different DM allow comparing the risk proneness degree of different FGCs. It provides a possibility to build model estimates based on the decisions taken by the experienced FGC. Estimates of other FGCs thus could be compared with the model ones, drawing conclusions on their management quality.

Conclusion. The objective of the research has been achieved due to solving the set problems. The suggested technology is a high-potential type of machine education that can be used both as a part of the DM's decision taking support systems and when training personnel whose role involves emergency operation control.

Keywords: decision tree; nature games; Hurwitz criterion; decision maker; inverse problem; assessing.

For citation: Valeriy Ya. Vilisov. Modeling the level of risk of decisions accepted at management fire elimination. *Pozharovzrybobezopasnost/Fire and Explosion Safety*, 2019, vol. 28, no. 3, pp. 36–49 (in Russian). DOI: 10.18322/PVB.2019.28.03.36-49.

✉ Valeriy Yakovlevich Vilisov, e-mail: vilisov@ut-mo.ru

Введение

Российская единая система предупреждения и ликвидации чрезвычайных ситуаций (РСЧС) имеет иерархическую структуру, включающую федеральный, межрегиональный, региональный, муниципальный и объектовый уровни [1, 2]. На всех уровнях имеются соответствующие управляющие органы: на трех верхних — центры управления в кризисных ситуациях (ЦУКС), на двух нижних — дежурно-диспетчерские службы (ДДС). Все уровни охвачены автоматизированной информационно-управляющей системой (АИУС), обеспечивающей оперативный обмен сообщениями и приказами лиц, принимающих решения (ЛПР). В зависимости от возникающих задач и благодаря иерархической организации в случае необходимости могут быть использованы ресурсы всей системы РСЧС. Чем ниже уровень иерархии управления, тем выше динамика протекающих процессов и принимаемых решений. Фактор времени играет существенную роль в процессах управления на нижнем уровне, что обуславливает актуальность задачи обеспечения высокой эффективности реагирования на возникающие чрезвычайные ситуации (ЧС) в условиях острого дефицита времени.

К сфере ответственности РСЧС относятся разнообразные ЧС [2, 3]: поиск и спасение людей на суше и на море; предупреждение и ликвидация аварий и катастроф различной природы; тушение пожаров различной природы и др. Исследование, представленное в настоящей работе, основано на анализе процедур принятия решений при тушении пожара, хотя они во многом аналогичны и другим ситуациям. Эти процедуры, как правило, охватывают два нижних уровня иерархической системы управления МЧС, в которых межуровневое взаимодействие заключается в следующем: команды сверху вниз — выделение ресурсов (подразделений пожарной охраны, специальных технических средств и материалов), команды снизу вверх — информирование о текущем состоянии процесса тушения пожара и запросы о дополнительных ресурсах.

На нижнем уровне иерархии управления, где в качестве ЛПР выступает руководитель тушением пожара (РТП), многие действия и типовые процедуры регламентированы [4]: например, где располагать автоцистерны, куда подавать стволы и сколько, когда применять воду, а когда пену и т. п. Однако не все действия РТП могут быть регламентированы, и тогда руководитель принимает решение, опираясь на персональный опыт и текущую информацию об обстановке, поступающую по каналам связи от групп разведки или из других источников. В ряде случаев создается штаб тушения пожара как совещательный орган, но окончательные решения принимает РТП и на нем лежит ответственность за их принятие.

В последнее время в связи с бурным развитием информационно-коммуникационных и программно-технических средств, а также с комплектованием современными гаджетами не только рабочих мест ЛПР всех уровней управления РСЧС, но и исполнителей различных пожарных специальностей информационные потоки в АИУС существенно возросли. Эти обстоятельства, с одной стороны, создают потенциал для принятия более обоснованных решений, а с другой — при остром дефиците времени ограничивают возможности полноты восприятия неструктурированных потоков данных.

В таких условиях возникает острая потребность в системах поддержки принятия решений (СППР) при ликвидации ЧС [1, 2, 5, 6], которые позволили бы выполнять предварительную обработку поступающих данных, свертку и представление их руководителю в форме, удобной для восприятия, и желательно с учетом его персональной пропускной способности. Особенно остро такая потребность ощущается на нижних двух уровнях иерархии управления, обеспечивающих оперативное управление, где динамика процессов измеряется от десятков до долей минут. Для обеспечения требуемой функциональности СППР в настоящее время разрабатывается широкий спектр математических моделей, среди которых можно выделить три группы.

1. *Модели процессов развития пожара.* Они очень разнообразны и позволяют моделировать скорость распространения огня в различных средах и на объектах, например в помещениях различной конфигурации, при открытых и/или закрытых окнах и дверях, с различными видами пожарной нагрузки (материалов стен, полов, потолков, перекрытий и т. п.) [7–9], а также воздействие факторов пожара на людей [10]. Большая часть этих моделей представлена программными комплексами [6], позволяющими оценивать те или иные сценарии воздействия на огонь и развитие пожара.

2. *Модели систем массового обслуживания (СМО).* Этими моделями описываются такие процессы, как движение пожарных подразделений по вызову на пожаре в городской среде [1], “обслуживание” техническими средствами и персоналом очагов возгорания на пожаре, движение людей при их эвакуации из зданий [11–13]. Модели СМО, представленные в настоящее время рядом универсальных [14] и специализированных программных средств, позволяют просчитывать различные варианты и выбирать из них наилучшие исходя из тех или иных критериев.

3. *Модели выбора оптимального варианта (решения).* Именно в эту группу входят разнообразные модели исследования операций, позволяющие ЛПР выбирать наиболее предпочтительный вариант из дискретного или непрерывного множества альтернатив. К этой группе относятся алгоритмы выбора решений на основе матричных игр (антагонистических и с природой) [15–17], цепей Маркова [17], деревьев решений [17, 18] и др. Рассматриваемые в работе модели относятся именно к этой группе.

Модели третьей группы традиционно развиваются в самых разных сферах в *прямой постановке* (*прямые задачи выбора решений*), сохранившейся со времен зарождения прикладного направления, называемого “исследование операций”. Традиционная технология использования моделей этой группы предполагает, что имеется объект, вербальная цель исследования, в соответствии с которой аналитик (не ЛПР!) выбирает целевой показатель (как правило, один), строится целевая (целевая) функция (линейной или нелинейной структуры), связывающая целевой показатель с варьируемыми (выбираемыми) переменными. Параметры (коэффициенты) целевой функции задаются аналитиками из субъективных соображений. Затем решается задача поиска (выбора) таких значений переменных, которые бы обеспечили максимум или минимум целевой функции. Полученное решение в большинстве случаев оказывается оптимальным с точностью до структуры и параметров целевой функции, заданных аналитиком, поэтому подобная схема (прямая задача) выбора решений очень часто является

нежизнеспособной, как и многие процедуры управления без обратной связи.

В ряде работ [17] в качестве перспективных направлений использования моделей исследования операций в отличие от традиционной схемы предлагается построение их адаптивных вариантов, учитывающих опыт ЛПР, в интересах которых эти модели и создаются.

В настоящей работе предлагается один из вариантов (другие см. в [17]) построения механизма обратной связи, обеспечивающего адаптивность моделей принятия решений, используемых в процедурах управления тушением пожара. Это позволяет в целевой функции использовать параметры, выявленные по решениям именно того ЛПР, который несет ответственность за принятые и реализованные решения (в отличие от аналитика). Выявление параметров (а в некоторых случаях и структуры [17]) представляет собой *обратную задачу* принятия решений, замыкающую ту самую обратную связь, обеспечивающую адаптивность модели. Тогда обратная задача позволяет сделать прямую задачу адекватной предпочтениям ЛПР, а найденные по модели варианты решений не вызывают у них отторжения. В рамках такой технологии роль аналитика сводится лишь к подбору модели, структурно адекватной процедуре принятия решений, и в построении эффективного алгоритма решения обратной задачи (при необходимости может решаться и задача дискриминации структуры модели). Таким образом, аналитик полностью исключается из цикла управления, а процедура решения обратной задачи обеспечивает фактически аппроксимацию предпочтений ЛПР некоторой моделью выбора. При этом часто становится неважным количество целевых показателей (а значит, и целевых функций), влияющих на решение, так как все они аппроксимируются некоторой сверткой. Использование обратной задачи для настройки параметров или/и структуры модели оптимального выбора реализует фактически одну из адаптивных технологий принятия решений [16, 17].

Задача управления, рассматриваемая в данной работе, относится к нижнему уровню иерархической системы управления РСЧС и предназначена для включения ее в состав математического обеспечения СППР, предоставляющей выбор решений, имеющих уровень риска не хуже нормативного. Нормативный уровень риска определяется (в результате решения обратной задачи) по решениям, принятым ЛПР, имеющим допустимый уровень квалификации.

В работе процедура выбора решений при тушении пожара моделируется с помощью матричной игры с природой, параметр пессимизма-оптимизма которой (в рамках критерия Гурвица [15]) предложено оценивать путем решения обратной задачи по

наблюдениям за решениями, ранее принятыми опытным ЛПР, что обеспечит адаптивный характер управления. По алгоритмам решения прямой и обратной задач построена имитационная модель, и для данных, близких к реальным [1, 19], на этой модели проведен имитационный эксперимент, в котором имитировались различные ЧС, принимаемые решения и возникающие платежи. Результаты эксперимента подтвердили работоспособность предложенных алгоритмов.

В силу ограниченного объема публикации контур адаптации элементов платежной матрицы по решениям, принятым опытным ЛПР, здесь не рассматривается. Этот вид адаптации может быть выполнен аналогично другим подобным моделям, например антагонистическим матричным играм [17, 20] и управляемым цепям Маркова [17, 20].

Основной целью исследования, представленного в настоящей работе, является построение модели, отражающей уровень риска в решениях, принимаемых РТП. Модель должна быть построена по выборке наблюдений за решениями, принятыми конкретным РТП.

Для достижения этой цели необходимо решить следующие задачи:

- 1) выбрать тип модели принятия решений, структурно адекватной прикладному контексту управления;
- 2) построить алгоритм оценивания параметров модели по наблюдениям за решениями, принятыми РТП;
- 3) проанализировать качество модели принятия решений, построенной по наблюдениям за решениями, принятыми РТП, и сделать заключение о ее адекватности.

Постановка задачи

Действия РТП как ЛПР нижнего уровня иерархии управления РСЧС весьма разнообразны и зависят от многих факторов: объекта пожаротушения, окружающей обстановки (наличия рядом или в пределах досягаемости источников воды, близости к очагу возгорания других пожароопасных объектов и т. п.), имеющихся ресурсов, компетентности персонала и др. Задачи принятия решений (управления) на пожаре также достаточно разнообразны [3, 4, 6]: например, как оптимально расположить автомобили; как распределить пожарные стволы по площади объекта и по времени; когда и в каком составе проводить разведку пожарного состояния объекта, наличия и местоположения в нем людей; как и какими силами организовать эвакуацию людей из зоны пожара и т. п. Каждая из этих задач может быть представлена одной или несколькими моделями принятия оптимальных решений [1, 3, 5, 6].

Все действия РТП как ЛПР достаточно подробно документируются и находят свое отражение в карточке действий караула (КДК), которая в дальнейшем (в методическом плане разбора действий караула) является основанием для квалификации действий РТП как удовлетворительных или неудовлетворительных.

В нормативных документах и методических рекомендациях [4] действия РТП рассматриваются по отношению к некоторому перечню (около 30) типовых объектов пожаротушения (например, детские учреждения, культурно-зрелищные учреждения, жилые здания и др.). Жилые здания подразделяют на *малоэтажные* (высотой до 3 этажей включительно), *многоэтажные* (до 9 этажей), *повышенной этажности* (до 25 этажей) и *высотные* (более 25 этажей).

В настоящей работе в качестве типового объекта рассматриваются многоэтажные здания, как наиболее часто встречающийся объект пожаротушения, для которого в типовой состав сил и средств, участвующих в спасении людей, входят звенья газодымозащитной службы (ГДЗС), осуществляющей разведку, и звенья спасателей, выполняющих спасение и эвакуацию людей. Кроме того, специфика многоэтажности, состоящая в большом количестве помещений и этажей, существенно усложняет поиск людей, которые могут находиться в одном или нескольких из десятков или сотен помещений, что увеличивает время выполнения разведывательных и/или спасательных операций. Задымление, и/или открытый огонь, и/или опасность обрушения еще больше усложняет задачи поиска и спасения, так как обнаруженные в одном помещении люди через некоторое время, спасаясь от обрушения или дыма, могут мигрировать в другие помещения, что приводит к быстрому устареванию данных, полученных в результате разведки, выполняемой звеном ГДЗС [4], а значит, к уменьшению шансов на их эвакуацию и спасение.

Фрагмент типовой карточки действий караула в части рассматриваемой процедуры поиска и эвакуации людей из многоэтажного здания имеет примерно такой вид:

- 2:28 — Отправлено звено ГДЗС из 2-х чел. в секцию 3 здания для разведки (поиска людей);
- 2:35 — Обнаружены 2 чел. на 4-м этаже в секции 3 в двух смежных помещениях. Пути эвакуации отрезаны сильным задымлением. Требуется пожарная лестница для эвакуации людей через балкон 4-го этажа или звено спасателей со специальным дыхательным оборудованием для эвакуации через лестничный марш;
- 2:38 — Отправлено звено спасателей из 3-х чел. с дыхательным оборудованием на 2-х чел. в секцию 3 здания для эвакуации людей;

- 2:48 — Отправлено звено ГДЗС из 2-х чел. в секцию 2 здания для поиска людей;
- ...
- 3:52 — После ликвидации последствий пожара в здании погибших людей не обнаружено, количество травмированных людей — 4. Всего на момент возникновения пожара в здании находилось 36 чел.

Таким образом, при поиске и эвакуации людей в многоэтажном здании могут чередоваться решения РТП о разведке и решения об эвакуации людей. Эти решения в зависимости от ситуации и опытности РТП могут приниматься в любой, наилучшей на его взгляд, последовательности и в любом количестве циклов (разведки — эвакуации). “Платежи” от реализации принятых решений носят накопительный характер и не могут быть измерены по результатам исполнения каждого решения, а становятся известными после ликвидации последствий пожара (например, прямой материальный ущерб, количество погибших и травмированных людей и другие количественные показатели ущерба от пожара).

Прямая задача. Как видно из приведенного фрагмента карточки действий караула на пожаре, ЛПР практически всегда стоит перед дилеммой — потратить часть времени на разведку (поиск людей), уточнение и прогнозирование ситуации или, используя свой опыт и интуицию (в том числе рефлексивную), направить силы и средства в определенные места здания для эвакуации и/или спасения людей.

Процедура принятия решений в циклах “разведка и/или спасение” может быть [6] представлена матричной игрой с природой. Игра задана, если известны все элементы ее платежной матрицы

$$C = \|c_{ij}\|_{mn} \quad (1)$$

и критерий выбора оптимального решения [15, 20]. Здесь столбцы соответствуют состояниям природы $s_j \in S$, где S — множество состояний природы, а строки — вариантам решений $d_i \in D$, где D — множество вариантов решений.

В состав множества решений D могут входить, например, решения: d_1 — направить звено разведки в составе 2 чел.; d_2 — направить звено спасателей в составе 3 чел. для эвакуации людей и т. п. Множество состояний природы S в контексте задачи спасения людей из горящего здания должно состоять из вариантов размещения людей в помещениях здания. Так, крайние значения таких состояний могут отражать информацию о максимальном рассредоточении людей по помещениям здания ($\bar{p}$) или локализации их в одном определенном помещении.

С учетом необходимости измерения элементов модели по реальной статистике, отражаемой в КДК,

представим состояния s_j в единицах негэнтропии (экстропии) $h(\bar{p})$, т. е. величины, противоположной энтропии [20]:

$$h(\bar{p}) = 1 + \sum_{i=1}^n p_i \log_n p_i, \quad (2)$$

где $\bar{p}$ — вектор вероятностей (доли) пребывания людей в том или ином из n помещений;

$$\bar{p} = [p_1 p_2 \dots p_n]^T;$$

T — символ транспонирования.

Здесь и далее будем использовать логарифм по основанию, равному числу элементов (помещений), что обеспечит варьирование энтропии в интервале $[0; 1]$. Использование негэнтропии в качестве меры рассеяния людей по помещениям позволяет единообразно учитывать различные статистические данные по пожарам в зданиях. Данная мера позволяет также унифицировать состояния природы в количестве от двух и выше в зависимости от необходимой степени дифференциации распределения людей в здании по помещениям. Таким образом, $h(\bar{p})$ является показателем степени концентрации людей: при равномерном распределении их по помещениям $h(\bar{p}) = 0$, при концентрации всех в одном помещении $h(\bar{p}) = 1$. Чем выше концентрация людей, тем, как правило, легче проводить их эвакуацию, в том числе потому, что не требуется отыскивать их по отдельным помещениям в сложных условиях пожара и дефицита времени. По мере выполнения поисково-спасательной операции показатель $h(\bar{p})$ может как увеличиваться, так и уменьшаться. Так, разведка, проводимая непрерывно или циклически, увеличивает негэнтропию, снимая неопределенность, а развитие пожара может ее уменьшить (например, разогнать людей из одного помещения в силу опасности пребывания в нем по нескольким помещениям). Статистические данные [19] по проведению спасательных операций при пожарах показывают, например, что звено спасателей из 2 чел. может эвакуировать за один раз 2 чел. с вероятностью, равной 1, 3 чел. — с вероятностью 0,4 и 4 чел. — с вероятностью 0,2.

Платежи в матрице (1) должны отражать количество спасенных людей при различных сочетаниях состояний природы и принятых решениях. В дальнейшем без потери общности будем рассматривать в качестве платежей количество спасенных людей, хотя в реальной пожарной статистике абсолютное количество спасенных людей на различных пожарах существенно варьируется и более универсальной единицей измерения платежа является доля спасенных людей при том или ином конкретном пожаре. Однако в случае необходимости относительные единицы (доли) могут быть пересчитаны в абсолютные и наоборот. Значения элементов платежной

матрицы могут быть получены по многочисленным статистическим данным, представляемым в КДК [19] в виде оценок, аналогичных построенным автором для других форм моделей (например, антагонистических матричных игр [17, 20] или управляемых цепей Маркова [17]).

Задача выбора оптимального решения d_{opt} заключается в максимизации целевой функции $L(d_i)$:

$$d_{opt} = \arg \max_{d_i \in D} L(d_i). \quad (3)$$

Правило выбора оптимального решения (3) называют критерием [15, 18, 20]. В теории выбора оптимальных решений в условиях риска и неопределенности [15, 20] различают несколько типов критериев, отличающихся целевой функцией $L(d_i)$:

- для критерия Вальда [15] — пессимистического (максиминного):

$$L(d_i) = \min_{s_j \in S} c_{ij}; \quad (4)$$

- для критерия оптимистического (максимаксного):

$$L(d_i) = \max_{s_j \in S} c_{ij}. \quad (5)$$

Один из комбинированных критериев — критерий Гурвица имеет целевую функцию, состоящую из взвешенной (с параметром λ) суммы целевых функций (4) и (5):

$$L(d_i) = \lambda \min_{s_j \in S} c_{ij} + (1 - \lambda) \max_{s_j \in S} c_{ij}. \quad (6)$$

Параметр $\lambda \in [0; 1]$ отражает степень риска в выборе решения. При $\lambda = 0$ критерий Гурвица превращается в критерий Вальда, соответствующий безрисковой, очень осторожной позиции ЛПР. При $\lambda = 1$ ЛПР придерживается позиции, имеющей крайне высокую степень риска, надеясь, что природа будет к нему благосклонна и выигрыш будет максимально возможным.

Поскольку в настоящей работе основным элементом исследования является показатель риска в принимаемых решениях, который в виде параметра λ из всех критериев этого типа присутствует лишь в критерии Гурвица, другие критерии [15] не рассматриваются.

Чтобы решить *прямую задачу* (1), (3), (6), необходимо знать все значения c_{ij} и параметра λ , что позволит найти оптимальное решение, которое будет “оптимальным” с точностью до адекватности используемых значений c_{ij} и λ реальным предпочтениям ЛПР, в интересах и под ответственность которого выбирается решение.

Варианты применения модели в процедурах принятия решений. Если модель построена, то каким образом она может использоваться на практике? Диапазон таких вариантов широкий [18, 20] —

от “никак не использовать”, а продолжать управлять “вручную” (если ЛПР, несущий ответственность за результаты управления, не доверяет модели или предпочитает другие способы выбора решения) до полного доверия и автоматического управления на основе модели. В числе промежуточных вариантов использования модели в управлении существуют [14, 17]: информационно-советующий режим (модель предлагает, а ЛПР отвергает, корректирует или принимает); множественный выбор (когда модель предлагает несколько субоптимальных решений в окрестности оптимального, а ЛПР выбирает одно из них, или корректирует, или отвергает) и др. Эти промежуточные варианты, как правило, реализуются в составе систем поддержки принятия решений (СППР), обеспечивая более гибкое управление по сравнению с крайними вариантами. Кроме того, промежуточные режимы позволяют плавно перейти от “ручного” к максимально автоматическому управлению, если на протяжении достаточного времени ЛПР убеждается, что приемлемая доля предлагаемых моделью решений удовлетворительна.

Позитивный эффект от применения модели в том или ином режиме в составе СППР может заключаться в следующем:

- сокращается цикл управления (что очень важно при дефиците времени при ликвидации пожара);
- решение не зависит от физического состояния ЛПР;
- модель может быть использована другим субъектом, выполняющим роль ЛПР (т. е. функция выбора решения может быть отделена от ЛПР-субъекта, модель тиражирована и т. п.);
- появляется возможность сравнивать модели, построенные для разных ЛПР-субъектов, и на этой основе обучать менее опытных ЛПР.

Обратная задача. Для подавляющего большинства прикладных областей, в которых делаются попытки применения рассматриваемой (и не только) модели, неизбежно возникает *априорная неопределенность*. Она состоит в том, что значения c_{ij} и λ неизвестны и их надо задать максимально адекватно объекту моделирования, и тогда найденное “оптимальное” решение будет условно (с точностью до адекватности) оптимальным. Сложность даже для рассматриваемого простейшего варианта модели заключается в том, что объект моделирования расщеплен на две части: одна (объективная) находится в стихии пожара, а вторая (субъективная) — в голове ЛПР. Объективная формирует состояния и платежи, а субъективная — отношение к этим платежам (их полезность), позицию (осторожную или нет) и варианты решений.

В традиционной парадигме исследования операций элементы модели должны быть заданы ана-

литиками (постановщиками задачи). Аналитики же в отличие от ЛПР не несут ответственности за последствия от реализации решений, принимаемых на основе модели. В этом состоит одно из основных противоречий традиционной парадигмы применения моделей.

В подавляющем большинстве современных приложений такая схема нежизнеспособна, так как даже если априори все элементы заданы адекватно и решения, получаемые с помощью модели, всех устраивают, то в силу различных обстоятельств (в том числе нестационарности среды, и/или системы ценностей, и/или опыта ЛПР) через некоторое время они перестают устраивать, т. е. априорная неопределенность сменяется текущей.

Имеются многочисленные исторические факты, согласно которым от внедренных оптимизационных моделей через некоторое время отказывались (в связи с рассогласованием между решениями, получаемыми по модели, и здравым смыслом ЛПР) и возвращались к “ручному” управлению.

Известны случаи, когда предпринимались попытки нормативного определения априорных значений некоторых из этих элементов “на все случаи жизни” (так, например, для процедур выбора инвестиционных проектов параметр критерия Гурвица должен иметь значение 0,3). В других случаях (при многокритериальном выборе [14, 18]) для снятия априорной и/или текущей неопределенности создаются экспертные процедуры, которые предусматривают “добывание” у ЛПР необходимых сведений.

В ряде работ [16] предлагается вместо нормативного подхода (априорного задания структуры и параметров моделей) использовать *адаптивный*, согласно которому модель надо как-то подстраивать под ЛПР, адаптировать к нему, чтобы обеспечить необходимую адекватность и доверие.

Вместе с тем в последние годы интенсивно развиваются методы *машинного обучения*, которые направлены на оценивание параметров моделей (распознавания, классификации и других процедур выбора) по прошлой статистике выбора, выполненного “Учителем”. Эти методы во многом аналогичны методам *идентификации* динамических систем.

В настоящей работе (и в ряде других работ автора [17]) предлагается подход, аналогичный упомянутым (адаптация, машинное обучение, идентификация), при котором по прошлой статистике оцениваются параметры модели (обратная задача) для их последующего использования при выборе решений (прямая задача).

Таким образом, под обратной задачей в работе понимается (применительно лишь к показателю пессимизма-оптимизма) следующее: по совокупности данных о решениях d^k (где k — номер наблюдения;

$k = 1, \dots, K$), принятых ЛПР, и о полученных при этом платежах c^k построить оценку параметра пессимизма-оптимизма критерия Гурвица.

Многошаговый выбор. Традиционная прямая задача выбора (1), (3), (6) — одношаговая. Она может повторяться много раз, но в ней нет взаимосвязи между шагами принятия решений. В рассматриваемом объекте (процедуре спасения людей из многоэтажного здания) такая связь есть, так как последующий выбор связан с тем, что известно к текущему моменту по данным разведки или из других источников. Эта связь не глубокая, поскольку ситуация на пожаре изменяется очень динамично, и это желательно учесть в модели выбора. Простой способ сделать это — воспользоваться деревом решений, которое затем можно нормализовать [20], т. е. привести к матричной форме (1), а значит, и в целом постановку задачи привести к виду (1), (3), (6).

Процедура нормализации зависит от следующих свойств дерева решений: числа уровней, числа исходов по уровням, степени регулярности дерева. Ниже приведено описание процедуры нормализации для примера дерева (рис. 1), используемого далее в имитационном эксперименте.

Здесь первый шаг (выполняет природа) соответствует исходной (на текущий момент) информации, которой располагает ЛПР, о местоположении людей в здании, где исход a , например, соответствует значению $h(\bar{p}) = 0$; b — значению $h(\bar{p}) = 0,3$; c — значению $h(\bar{p}) = 0,7$; d — значению $h(\bar{p}) = 1$.

На втором шаге (выполняет ЛПР) по текущей информации (a , или b , или c , или d) ЛПР делает свой выбор: 0 — отправить звено разведки; 1 — отправить звено спасателей.

На третьем шаге (выполняет природа) проявляется фактическое состояние природы и происходит платеж, определяющий вклад данной цепочки управления в общий вклад поисково-спасательной операции (травмирование, гибель, ущерб, т. е. значения на конечных вершинах дерева).

Поскольку на втором шаге дерева ЛПР принимает решение в зависимости от оценки состояния

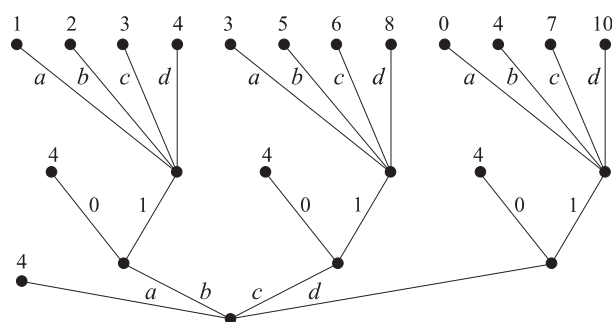


Рис. 1. Дерево решений при управлении ликвидацией пожара

Fig. 1. Decision tree made in the management of fire suppression

на первом шаге, подобные решения обычно [15, 20] представляют в виде вектора стратегий ЛПР, имеющего структуру “если ... то”. Для дерева, приведенного на рис. 1, количество ситуаций, требующих выбора ЛПР, на первом уровне равно трем (b, c, d), исходя из того, что ЛПР не рассматривает крайнюю ситуацию, когда люди равномерно рассредоточены по всему зданию (ситуация a):

$$f = \begin{bmatrix} x \\ y \\ z \end{bmatrix}. \quad (7)$$

Размерность вектора стратегий r равна числу исходов на первом уровне дерева, которые приводят к необходимости ЛПР делать свой выбор на втором уровне дерева (для рис. 1 $r = 3$). Элементы вектора стратегий могут принимать значения из множества исходов второго уровня (для рис. 1 $s = 2$): $x, y, z \in \{0; 1\}$. Тогда полное количество стратегий f_i ЛПР составит $m = s^r$.

Количество состояний природы определяется количеством сочетаний вариантов ее выбора на всех уровнях дерева. Для дерева, приведенного на рис. 1, эта величина определится как $n = n_1 \times n_3$ (где n_1 — число исходов 1-го уровня, участвующих в стратегиях ЛПР; n_3 — число исходов 3-го уровня).

В результате нормализации дерево преобразуется в платежную матрицу, в которой роль вариантов решений ЛПР принимают стратегии ($d_i \triangleq f_i$), а роль состояний природы s_j — все возможные сочетания “выбора” природы на ее различных шагах.

Матрица платежей заполняется в соответствии с тем, какой стратегии (строке) и состоянию природы (столбцу) соответствует конкретный элемент матрицы, а также согласно тем исходам (конечным вершинам), к которым приводит последовательность: выбор природы (первый из двух элементов, соответствующих состоянию природы — столбцу); выбор ЛПР согласно стратегии (строке), учитывающей выбор природы на первом шаге; выбор природы (второй из двух элементов, соответствующих состоянию природы — столбцу).

Таким образом, нормализация превращает многошаговую процедуру выбора решений в одношаговую, представленную задачей (1), (3), (6), в которой, однако, учитывается многошаговый характер реальных процессов управления.

Решение

Рассмотрим задачу оценивания параметра λ по выборке наблюдений за решениями, принятыми ЛПР. По выражению (6) можно построить зависимости $L_{opt}(\lambda)$ и $f_{opt}(\lambda)$. Для рассматриваемого примера (см. рис. 1) эти зависимости приведены на рис. 2.

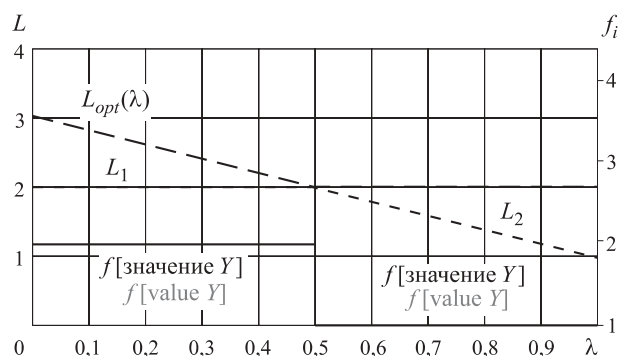


Рис. 2. Параметрические зависимости оптимальных значений целевой функции $L_{opt}(\lambda)$ и решения ЛПР $f_{opt}(\lambda)$

Fig. 2. Parametric dependences of the optimal values of the objective function $L_{opt}(\lambda)$ and the decision $f_{opt}(\lambda)$ taken by the decision maker

По $L_{opt}(\lambda)$ и $f_{opt}(\lambda)$ могут быть построены обратные функции: $\lambda(L_{opt})$ и $\lambda(f_{opt})$. Тогда по наблюдениям за решениями, принятыми ЛПР, может быть получена оценка параметра $\lambda \in [0; 1]$, которая и отражает меру риска, свойственную данному ЛПР.

Так, если, по данным наблюдений ЛПР использует стратегию f_1 , т. е. при любой информации о пребывании людей принимает решение $d_1 = 0$ (направляет не спасателей, а звено разведки), то его показатель риска находится в интервале $[0,5; 1]$, а платежи определяются целевой функцией L_1 . Это соответствует уровню риска, более близкому к тому, что заложен в критерий Вальда — позиция крайнего пессимизма (максиминное решающее правило). Если, судя по наблюдениям, используется стратегия f_2 , т. е. при неопределенной информации о пребывании людей на первом шаге ($h = 0$) ЛПР принимает решение $d_1 = 0$ (разведка), а при полной определенности ($h = 1$) — решение $d_2 = 1$ (работают спасатели), то его показатель риска находится в интервале $[0; 0,5]$, а платежи определяются целевой функцией L_2 . Это соответствует уровню риска, свойственному оптимистическому критерию (позиция крайнего оптимизма, т. е. максимаксное решающее правило). Конечно, подобная интервальная оценка, полученная по обратной функции $\lambda(f_{opt})$, в некоторых случаях может быть достаточно грубой. В то же время исследования показывают, что при большем количестве состояний (уровней негэнтропии) можно получить более точную (с меньшим интервалом) оценку показателя риска λ .

Заметим, что в реальной практике ЛПР может не придерживаться одной чистой стратегии, а использовать смешанную, в которой чистые стратегии участвуют с некоторыми вероятностями [15, 20]. Тогда величину риска, которой придерживается ЛПР, можно оценивать по наиболее часто используемой чистой стратегии либо вычислять как средне-

взвешенное значение с учетом частот (как весов) использования чистых стратегий.

Алгоритм

Типовую последовательность действий по выявлению уровня риска, допускаемого ЛПР в процессе принятия решений, представим в виде следующих этапов.

Этап 1. Представить дерево решений в нормальной (матричной или табличной) форме одним из существующих способов [17, 20].

Этап 2. Построить зависимости оптимальной целевой функции и оптимальных решений от параметра λ : $L_{opt}(\lambda)$ и $f_{opt}(\lambda)$, воспользовавшись выражениями для критерия Гурвица (4) и (5). По ним построить обратные функции: $\lambda(L_{opt})$ и $\lambda(f_{opt})$.

Этап 3. По статистическим данным наблюдений за решениями ЛПР на основании обратной зависимости $\lambda(f_{opt})$ вычислить оценку параметра λ , которая и будет соответствовать уровню риска ЛПР.

Имитационный эксперимент

Для иллюстрации применения приведенного алгоритма (по этапам) рассмотрим вариант задачи с тремя уровнями дерева решений и четырьмя уровнями неопределенности пребывания людей в здании, т. е. значениями негэнтропии (см. рис. 1).

Этап 1. Дерево приведено в сокращенном варианте: фрагменты, соответствующие необходимости разведки, опущены. Уровни состояний соответствуют четырем значениям негэнтропии $h \in \{0; 0,25; 0,5; 0,75\}$ в предположении, что полной определенности получить невозможно. Этим значениям соответствуют состояния $s_i \in \{a; b; c; d\}$. На первом шаге дерева при состоянии a ЛПР направляет процесс на разведку, а при остальных состояниях происходит движение по дереву. При нормализации де-

Таблица 1. Платежная матрица дерева решений

Table 1. Decision tree payment matrix

f_i	s_j											
	ba	bb	bc	bd	ca	cb	cc	cd	da	db	dc	dd
000	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4
001	3	3	3	3	3	3	3	3	0	4	7	10
010	4	4	4	4	3	5	6	8	4	4	4	4
011	4	4	4	4	3	5	6	8	0	4	7	10
100	1	2	3	4	4	4	4	4	4	4	4	4
101	1	2	3	4	4	4	4	4	0	4	7	10
110	1	2	3	4	3	5	6	8	4	4	4	4
111	1	2	3	4	3	5	6	8	0	4	7	10

рева решений принимаются во внимание восемь чистых стратегий ЛПР, соответствующих трем значениям состояний на первом шаге дерева ($b; c; d$):

$$f_1 = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix}; \quad f_2 = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 1 \end{bmatrix}; \quad f_3 = \begin{bmatrix} 0 \\ 1 \\ 0 \end{bmatrix}; \quad f_4 = \begin{bmatrix} 0 \\ 1 \\ 1 \end{bmatrix};$$

$$f_5 = \begin{bmatrix} 1 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix}; \quad f_6 = \begin{bmatrix} 1 \\ 0 \\ 1 \end{bmatrix}; \quad f_7 = \begin{bmatrix} 1 \\ 1 \\ 0 \end{bmatrix}; \quad f_8 = \begin{bmatrix} 1 \\ 1 \\ 1 \end{bmatrix}. \quad (8)$$

Чистые стратегии природы определяются всеми возможными сочетаниями трех значений состояний на 1-м шаге и четырех — на 3-м (всего 12 состояний — от s_1 до s_{12}): (b, a), (b, b), (b, c), (b, d), (c, a), (c, b), (c, c), (c, d), (d, a), (d, b), (d, c), (d, d). Платежная матрица, построенная по дереву решений, имеет размерность 8×12 (табл. 1).

Этап 2. Для построения зависимости $f_{opt}(\lambda)$ проварьированы значения λ с шагом 0,1 на интервале $[0; 1]$ и для каждого из них вычислены оптимальные значения целевой функции $L(f_i)$. Шаг варьирования λ может быть сколь угодно малым для обеспечения

Таблица 2. Оптимальные значения целевой функции критерия Гурвица

Table 2. Optimal values of the objective function of the Hurwitz criterion

f_i	λ										
	0,0	0,1	0,2	0,3	0,4	0,5	0,6	0,7	0,8	0,9	1,0
000	4,0	4,0	4,0	4,0	4,0	4,0	4,0	4,0	4,0	4,0	4,0
001	10,0	9,1	8,2	7,3	6,4	5,5	4,6	3,7	2,8	1,9	1,0
010	8,0	7,5	7,0	6,5	6,0	5,5	5,0	4,5	4,0	3,5	3,0
011	10,0	9,1	8,2	7,3	6,4	5,5	4,6	3,7	2,8	1,9	1,0
100	4,0	3,7	3,4	3,1	2,8	2,5	2,2	1,9	1,6	1,3	1,0
101	10,0	9,1	8,2	7,3	6,4	5,5	4,6	3,7	2,8	1,9	1,0
110	8,0	7,3	6,6	5,9	5,2	4,5	3,8	3,1	2,4	1,7	1,0
111	10,0	9,1	8,2	7,3	6,4	5,5	4,6	3,7	2,8	1,9	1,0
$L_{opt}(\lambda)$	10,0	9,1	8,2	7,3	6,4	5,5	5,0	4,5	4,0	4,0	4,0
$f_{opt}(\lambda)$	f_2	f_2	f_2	f_2	f_2	f_3	f_3	f_3	f_1	f_1	f_1

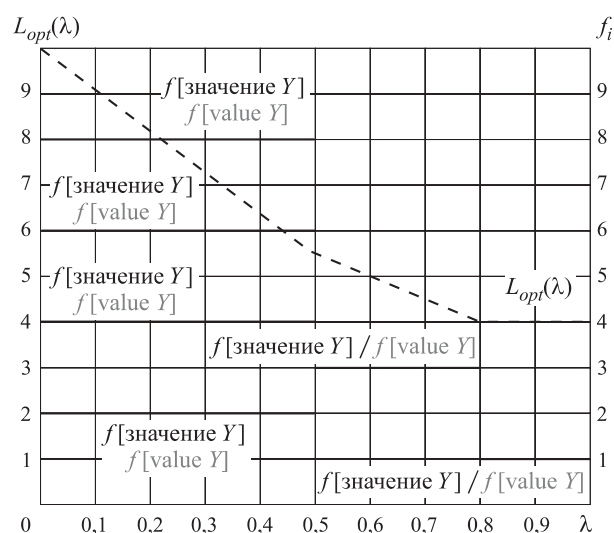


Рис. 3. Прямые функции $L_{opt}(\lambda)$ и $f_{opt}(\lambda)$

Fig. 3. Direct functions $L_{opt}(\lambda)$ and $f_{opt}(\lambda)$

необходимой точности. Результаты расчетов приведены в табл. 2.

Построенные по результатам варьирования параметра λ функции $L_{opt}(\lambda)$ и $f_{opt}(\lambda)$ представлены на рис. 3. Как видно из табл. 2, на интервале $\lambda \in [0; 0,5]$ функция многозначна ($f_i = f_2, f_4, f_6, f_8$). По прямой функции построены обратные функции $\lambda(L_{opt})$ и $\lambda(f_{opt})$.

Таким образом, результатом выполнения первых двух этапов алгоритма являются обратные функции $\lambda(L_{opt})$ и $\lambda(f_{opt})$, вид которых полностью определяется исходными данными задачи (структурой дерева и платежами).

На третьем этапе алгоритма, в зависимости от того, какие решения принимает ЛПР в тех или иных ситуациях (состояниях природы), получим оценку риска в его действиях. Проиллюстрируем процедуру оценивания риска с помощью имитационного моделирования ситуаций, возникающих в процессе управления пожаротушением, и решений, принимаемых в них ЛПР.

Этап 3. Статистические свойства (вероятности) состояний природы, возникающих на первом и третьем шагах дерева решений, при имитации были следующими: $P(a) = 0,3$; $P(b) = 0,3$; $P(c) = 0,3$; $P(d) = 0,1$. При имитации решений ЛПР в тех или

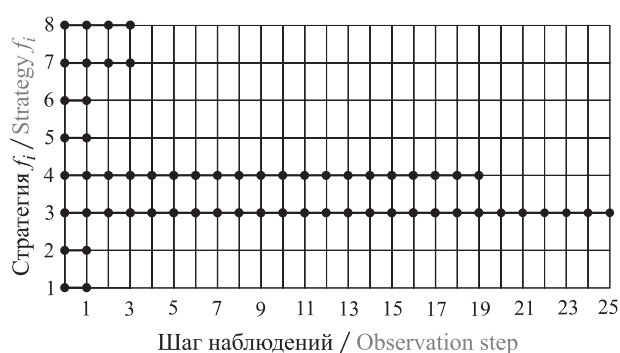


Рис. 4. Пошаговая интервальная оценка стратегии ЛПР

Fig. 4. Step-by-step interval estimation of the decision maker's strategy

иных ситуациях (состояниях природы) было принято, что ЛПР придерживается чистой стратегии f_3 (см. (8)).

Фрагмент реализации, включающей сгенерированные случайным образом, с указанными вероятностями, состояния природы и симитированные (по стратегии f_3) решения ЛПР в этих ситуациях, а также соответствующие им платежи, приведен в табл. 3.

В результате пошагового анализа по мере поступления наблюдений построены точечная и интервальная оценки стратегии, применяемой ЛПР. Точечная оценка заключается в вычислении одной (наиболее вероятной) из восьми стратегий по текущей выборке наблюдений. На 20-м шаге наблюдений таковой оказалась стратегия f_3 . Интервальная оценка — это подмножество стратегий, которым могла бы соответствовать совокупность наблюдаемых на текущий момент пар *состояние природы – решение ЛПР*. Для рассматриваемого примера интервальная оценка сошлась к стратегии f_3 также на 20-м шаге (рис. 4). Таким образом, оба типа оценок совпали с той стратегией, которая имитировала поведение ЛПР в случайно возникающих (имитируемых) ситуациях.

На рис. 5 приведены обратные функции $\lambda(L_{opt})$ и $\lambda(f_{opt})$, вычисленные на 2-м шаге алгоритма.

На основании полученной по наблюдениям оценки стратегии ЛПР (f_3) на функции $\lambda(f_{opt})$ выделен интервал $\lambda \in [0,5; 0,8]$, которому соответствует уровень риска ЛПР. Таким образом, оценкой степени

Таблица 3. Фрагмент выборки наблюдений / Table 3. Fragment of a sample of observations

Номер шага / Step number	Наблюдение / Observation									
	1	2	3	4	5	6	7	8	...	100
1 (Природа / Nature)	c	b	c	c	b	c	b	c	...	b
2 (ЛПР / Decision maker)	1	0	1	1	0	1	0	1	...	0
3 (Природа / Nature)	a	c	a	c	a	b	d	c	...	a
Платеж / Payment	3	4	3	6	4	5	4	6	...	4

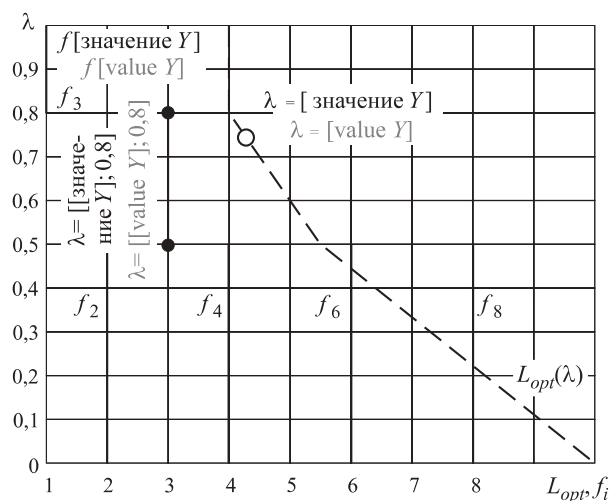


Рис. 5. Обратные функции $\lambda(L_{opt})$ и $\lambda(f_{opt})$

Fig. 5. Inverse functions $\lambda(L_{opt})$ and $\lambda(f_{opt})$

риска λ в принимаемых ЛПР решениях является интервал $[0,5; 0,8]$.

Среднее значение платежа за период наблюдений $\lambda(\bar{L}_{opt}) = 4,27$. Значение функции $\lambda(L_{opt})$ не противоречит полученной оценке λ , так как $\lambda(\bar{L}_{opt}) = 0,746$, т. е. находится в пределах интервальной оценки риска $[0,5; 0,8]$.

Обсуждение результатов

Приведем несколько расширенную трактовку рассмотренного в работе подхода и полученных результатов.

Оценивание эффективности деятельности ЛПР лишь по конечным интегральным показателям (например, величина материального ущерба и число жертв на пожаре) в большинстве случаев является неконструктивным, так как полученные оценки показателей не структурированы и не позволяют выявить управляемые переменные. Представление (аппроксимация) процедуры выбора решения адекватной моделью позволяет структурировать выбор и выявить значимые факторы или индикаторы.

Предлагаемый в работе метод оценивания показателя риска в решениях ЛПР можно отнести к задачам параметрической идентификации [17] ЛПР, как “черного ящика” по данным наблюдений за решениями, принимаемыми им в процессе нормального функционирования. Оценивание параметра выполняется в предположении, что процедура принятия решения структурно представима в виде игры с природой при отсутствии данных о вероятностях состояний природы. Тогда критерий Гурвица, как одна из схем принятия решений в условиях риска и неопределенности [15], представляется достаточно универсальной моделью, аппроксимирующей выбор ЛПР.

В том случае, когда в распоряжении ЛПР имеются данные о вероятностях состояний природы (по-

лученные, например, по прошлой статистике), моделью выбора, структурно соответствующей ситуации, можно считать критерий Ходжа-Лемана [15], содержащий параметр степени доверия ЛПР оценкам вероятностей состояний природы. В этом критерии с помощью параметра смешиваются критерий Вальда (крайнего пессимизма, максиминный) и критерий Лапласа-Байеса (учитывающий вероятности состояний природы).

Оба параметра смеси, будучи оцененными по наблюдениям за принятыми ЛПР решениями, отражают персональную позицию (состояние) ЛПР, исходя из которой он принимает решение. Такое двухпараметрическое отображение свойств ЛПР могло бы быть развитием однопараметрической меры (риска), как более информативное средство мониторинга ЛПР.

Параметрическая идентификация ЛПР, помимо режима нормального функционирования, может проводиться и в гораздо более ускоренном темпе и при меньшем количестве данных, если воспользоваться инструментами оптимального планирования эксперимента [17]. Применительно к управлению ликвидацией пожаров планирование эксперимента, естественно, возможно лишь в рамках учений и/или с использованием технических средств информационно-управляющей системы МЧС в режиме имитации.

Оценивание показателя риска в решениях ЛПР для использования в управлении ликвидацией ЧС не единственная сфера применения предлагаемого подхода. Знание фактического уровня риска (или склонности к риску) в решениях, принятых ЛПР, важно, например, в инвестиционном менеджменте, где желательно знать, насколько рискованны инвестиционные решения ЛПР. Степень склонности к риску важна и в управлении производственными программами [17]. При обучении опытными операторами робототехнических систем (РТС), используемых как в оборонных приложениях, так и в других экстремальных средах, также важен уровень риска, допускаемый ЛПР в качестве нормативного при принятии РТС решений в автономном режиме [16].

Имея в виду большое разнообразие структурно различных процедур принятия решений, возникающих и применяемых на всех уровнях иерархии управления в МЧС, можно использовать широкий спектр моделей принятия решений [17], таких как задачи математического программирования (линейного, квадратичного, дискретного и др.), антагонистические матричные игры, цепи Маркова с доходами и др. Аппроксимация этими моделями процедур принятия решений ЛПР также может выполняться как параметрическая идентификация [17], а оценки параметров также будут отражать персональные свойства ЛПР, которые могут быть использованы

для управления с использованием построенных моделей.

К числу недостатков предложенного подхода можно отнести следующие:

- интервальная оценка параметра λ , полученная по наблюдениям за решениями, принятыми ЛПР, существенно зависит от данных, которые в некоторых случаях могут приводить к очень широкому интервалу, не позволяющему получить желаемую локализацию позиции ЛПР;
- при увеличении числа уровней дерева решений количество чистых стратегий ЛПР, а также размерность построенной по дереву платежной матрицы существенно возрастают, увеличивая размерность последней, что, однако, не приводит к существенному росту вычислительной сложности задачи (для современных компьютеров) в силу простоты вычислительных процедур.

Выводы

Предложенный алгоритм выявления уровня риска в решениях, принятых ЛПР в ходе проведения поисково-спасательных операций в условиях чрезвычайных ситуаций, позволяет выявить стратегию,

которой придерживается ЛПР, и оценить средний платеж. Если полученный от управления эффект признается компетентными лицами (экспертами), оценивающими решения, удовлетворительным, то в дальнейшем подобный уровень риска может быть признан приемлемым и на его основе могут быть построены системы поддержки принятия решений при управлении поисково-спасательными операциями подобного типа.

Применение предложенного подхода может позволить выявить по статистическим данным о решениях, принимаемых заведомо эффективными и опытными ЛПР (экспертами), предельно достижимые уровни эффекта (количество спасенных в чрезвычайных ситуациях людей) и соответствующие им эталонные стратегии принятия решений. Подобные предельные эффекты и эталонные стратегии могут служить ориентиром при обучении менее опытных ЛПР, действующих в чрезвычайных ситуациях.

Таким образом, предложенный подход позволяет обеспечить уровень риска, приемлемый и согласованный с экспертами, оценивающими качество и эффективность управления операциями в чрезвычайных ситуациях.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Брушлинский Н. Н., Соколов С. В. Математические методы и модели управления в ГПС и РСЧС. — М. : АГПС МЧС России, 2011. — 250 с.
2. Семиков В. Л. Комплексные исследования проблем безопасности // Технологии техносферной безопасности. — 2015. — Вып. 5(63). — С. 235–242. URL: <http://agps-2006.narod.ru/ttb/2015-5/31-05-15.ttb.pdf> (дата обращения: 28.03.2019).
3. Брушлинский Н. Н., Клепко Е. А., Попков С. Ю., Соколов С. В. Управление пожарной безопасностью субъектов Российской Федерации на основе анализа пожарных рисков // Проблемы безопасности и чрезвычайных ситуаций. — 2010. — № 3. — С. 104–114.
4. Повзик Я. С. Пожарная тактика. — М. : ЗАО “Спецтехника”, 2004. — 416 с.
5. Пожарные риски: динамика, управление, прогнозирование / Под ред. Н. Н. Брушлинского, Ю. Н. Шебеко. — М. : ВНИИПО. 2007. — 370 с.
6. Тетерин И. М., Топольский Н. Г., Климовцов В. М., Прус Ю. В. Применение математической теории игр в системе поддержки принятия решений руководителем тушения пожара // Технологии техносферной безопасности. — 2008. — Вып. 6 (22). — 21 с. URL: <http://agps-2006.narod.ru/ttb/2008-6/09-06-08.ttb.pdf> (дата обращения 28.03.2019).
7. Macqueron C. Computational Fluid Dynamics Modeling of a wood-burning stove-heated sauna using NIST’s Fire Dynamics Simulator. — 2009. — 9 p. URL: <https://arxiv.org/ftp/arxiv/papers/1404/1404.6774.pdf> (дата обращения: 28.03.2019).
8. Steffen B., Seyfried A. Modelling of pedestrian movement around 90° and 180° bends // Conference at Advanced Research Workshop on Fire Protection and Life Safety in Buildings and Transportation Systems (15–17 October 2009, Santander). 11 p. URL: <https://arxiv.org/ftp/arxiv/papers/0912/0912.0610.pdf> (дата обращения: 28.03.2019).
9. Stroh R., Bect J., Demeyer S., Fischer N., Vazquez E. Gaussian process modeling for stochastic multi-fidelity simulators, with application to fire safety. — 2016. — 6 p. URL: <https://arxiv.org/pdf/1605.02561.pdf> (дата обращения: 28.03.2019).
10. Hamke E. E., Jordan R., Ramon-Martinez M. Breath Activity Detection Algorithm. — 2016. — 11 p. URL: <https://arxiv.org/ftp/arxiv/papers/1602/1602.07767.pdf> (дата обращения: 28.03.2019).
11. Ribeiro J., Almeida J. E., Rossetti R. J. F., Coelho A., Coelho A. L. Using serious games to train evacuation behaviour. — 2013. — 6 p. URL: <https://arxiv.org/ftp/arxiv/papers/1303/1303.3828.pdf> (дата обращения: 28.10.2018).

12. Yun K., Bustos J., Lu T. Predicting rapid fire growth (flashover) using conditional generative adversarial networks. — 2018. — 4 p. URL: <https://arxiv.org/ftp/arxiv/papers/1801/1801.09804.pdf> (дата обращения: 28.03.2019).
13. Zhang J., Seyfried A. Empirical characteristics of different types of pedestrian streams. — 2012. — 8 p. URL: <https://arxiv.org/ftp/arxiv/papers/1207/1207.5931.pdf> (дата обращения: 28.03.2019).
14. Бомас В. В., Судаков В. А. Поддержка субъективных решений в многокритериальных задачах. — М. : МАИ, 2011. — 176 с.
15. Лабскер Л. Г. Теория критериев оптимальности и экономические решения. — М. : Кнорус, 2009. — 744 с.
16. Новиков Д. А. Иерархические модели военных действий // Управление большими системами. — 2012. — Вып. 37. — С. 25–62.
17. Вилицов В. Я. Адаптивный выбор управленческих решений. Модели исследования операций как средство хранения знаний ЛПР. — Саарбрюкен, Германия : LAP LAMBERT Academic Publishing, 2011. — 376 с.
18. Петровский А. Б. Теория принятия решений. — М. : Академия, 2009. — 400 с.
19. Пожары и пожарная безопасность в 2016 г. : стат. сб. / Под общ. ред. Д. М. Гордиенко. — М. : ФГУ ВНИИПО, 2017. — 124 с.
20. Taha H. A. Operations research: an introduction. — 10th global ed. — Harlow, England : Pearson Education Limited, 2016. — 848 p.

REFERENCES

1. N. N. Brushlinskiy, S. V. Sokolov. *Matematicheskiye metody i modeli upravleniya v GPS i RSChS* [Mathematical methods and control models in State Fire Service and Russian System of Prevention and Response to Emergencies]. Moscow, State Fire Academy of Emercom of Russia Publ., 2011. 250 p. (in Russian).
2. V. L. Semikov. Complex researches of security problems. *Tekhnologii tekhnosfernoy bezopasnosti / Technology of Technosphere Safety*, 2015, issue 5(63), pp. 235–242 (in Russian). Available at: <http://agps-2006.narod.ru/ttb/2015-5/31-05-15.ttb.pdf> (Accessed 28 March 2019).
3. N. N. Brushlinsky, E. A. Klepko, S. Yu. Popkov, S. V. Sokolov. Fire safety management of subjects of the Russian Federation on the basis of fire hazard analysis. *Problemy bezopasnosti i chrezvychaynykh situatsiy / Safety and Emergencies Problems*, 2010, no. 3, pp. 104–114 (in Russian).
4. Ya. S. Povzik. *Pozharnaya taktika* [Fire tactic]. Moscow, ZAO “Spetstekhnika” Publ., 2004. 416 p. (in Russian).
5. N. N. Brushlinskiy, Yu. N. Shebeko (eds). *Pozharnyye riski: dinamika, upravleniye, prognozirovaniye* [Fire risks: dynamics, management, forecasting]. Moscow, VNIPO Publ., 2007. 370 p. (in Russian).
6. I. M. Teterin, N. G. Topolskiy, V. M. Klimovtsov, Yu. V. Prus. Application of mathematical theory of games in system of support of decision-making. *Tekhnologii tekhnosfernoy bezopasnosti / Technology of Technosphere Safety*, 2008, issue 6(22), 21 p. (in Russian). Available at: <http://agps-2006.narod.ru/ttb/2008-6/09-06-08.ttb.pdf> (Accessed 28 March 2019).
7. C. Macqueron. *Computational Fluid Dynamics Modeling of a wood-burning stove-heated sauna using NIST's Fire Dynamics Simulator*. 2009. 9 p. Available at: <https://arxiv.org/ftp/arxiv/papers/1404/1404.6774.pdf> (Accessed 28 March 2019).
8. B. Steffen, A. Seyfried. Modelling of pedestrian movement around 90° and 180° bends. In: *Conference at Advanced Research Workshop on Fire Protection and Life Safety in Buildings and Transportation Systems (15–17 October 2009, Santander)*. 11 p. Available at: <https://arxiv.org/ftp/arxiv/papers/0912/0912.0610.pdf> (Accessed 28 March 2019).
9. R. Stroh, J. Bect, S. Demeyer, N. Fischer, E. Vazquez. *Gaussian process modeling for stochastic multi-fidelity simulators, with application to fire safety*. 2016. 6 p. Available at: <https://arxiv.org/pdf/1605.02561.pdf> (Accessed 28 March 2019).
10. E. E. Hamke, R. Jordan, M. Ramon-Martinez. *Breath activity detection algorithm*. 2016. 11 p. Available at: <https://arxiv.org/ftp/arxiv/papers/1602/1602.07767.pdf> (Accessed 28 March 2019).
11. J. Ribeiro, J. E. Almeida, R. J. F. Rossetti, A. Coelho, A. L. Coelho. *Using serious games to train evacuation behaviour*. 2013. 6 p. Available at: <https://arxiv.org/ftp/arxiv/papers/1303/1303.3828.pdf> (Accessed 28 March 2019).
12. K. Yun, J. Bustos, T. Lu. *Predicting rapid fire growth (flashover) using conditional generative adversarial networks*. 2018. 4 p. Available at: <https://arxiv.org/ftp/arxiv/papers/1801/1801.09804.pdf> (Accessed 28 March 2019).
13. J. Zhang, A. Seyfried. *Empirical characteristics of different types of pedestrian streams*. 2012. 8 p. Available at: <https://arxiv.org/ftp/arxiv/papers/1207/1207.5931.pdf> (Accessed 28 March 2019).

14. V. V. Bomas, V. A. Sudakov. *Podderzhka subyektivnykh resheniy v mnogokriterialnykh zadachakh* [Support for subjective decisions in multi-criteria tasks]. Moscow, MAI Publ., 2011. 176 p. (in Russian).
15. L. G. Labsker. *Teoriya kriteriyev optimalnosti i ekonomicheskiye resheniya* [The theory of optimality criteria and economic decisions]. Moscow, Knorus Publ., 2009. 744 p. (in Russian).
16. D. A. Novikov. Hierarchical models of hostilities combat. *Upravlenie bol'simi sistemami / Large-Scale Systems Control*, 2012, issue 37, pp. 25–62 (in Russian).
17. V. Ya. Vilisov. *Adaptivnyy vybor upravlencheskikh resheniy. Modeli issledovaniya operatsiy kak sredstvo khraneniya znaniy LPR* [Adaptive choice of management decisions. Models of operations research as a means of storing knowledge of decision makers]. Saarbrücken, Germany, LAP LAMBERT Academic Publishing, 2011. 376 p. (in Russian).
18. A. B. Petrovskiy. *Teoriya prinyatiya resheniy* [Decision theory]. Moscow, Akademiya Publ., 2009. 400 p. (in Russian).
19. D. M. Gordienko (gen. ed.). *Pozhary i pozharnaya bezopasnost v 2016 godu. Statisticheskiy sbornik* [Fires and fire safety in 2016. Statistical yearbook]. Moscow, VNIPO Publ., 2017. 124 p. (in Russian).
20. H. A. Taha. *Operations research: an introduction*. 10th global ed. Harlow, England, Pearson Education Limited, 2016. 848 p.

Поступила 29.03.2019; после доработки 30.04.2019; принята к публикации 06.05.2019
Received 29 March 2019; received in revised form 30 April 2019; accepted 6 May 2019

Информация об авторе

ВИЛИСОВ Валерий Яковлевич, д-р экон. наук, канд. техн. наук, профессор, профессор кафедры математики и естественнонаучных дисциплин, Технологический университет, г. Королёв, Московская обл., Российская Федерация; ORCID: 0000-0002-2612-8593, Researcher ID: P-1650-2019, e-mail: vilisov@ut-mo.ru

Information about the author

Valeriy Ya. VILISOV, Dr. Sci. (Econom.), Cand. Sci. (Eng.), Professor, Professor of Department of Mathematics and Natural Sciences, Technological University, Korolyev, Moscow Region, Russian Federation; ORCID: 0000-0002-2612-8593, Researcher ID: P-1650-2019, e-mail: vilisov@ut-mo.ru



Издательство «ПОЖНАУКА»

Представляет книгу



Д. Г. Пронин, Д. А. Корольченко

ДЕЛЕНИЕ ЗДАНИЙ НА ПОЖАРНЫЕ ОТСЕКИ : учебное пособие.

— М. : Издательство "ПОЖНАУКА".

В учебном пособии изложены базовые основы, действующие требования и современные представления о целях, задачах и способах ограничения распространения пожара по зданиям и сооружениям путем их разделения на пожарные отсеки.

Пособие предназначено для студентов Московского государственного строительного университета. Оно может быть использовано также другими образовательными учреждениями и практическими работниками, занимающимися вопросами обеспечения пожарной безопасности.

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

<https://doi.org/10.18322/PVB.2019.28.03.50-58>

УДК 681.5

Модель оценки влияния мероприятий пожарной безопасности на агрегатную цель для цифровых двойников объектов ТЭК

© Н. Г. Топольский¹, И. В. Самарин^{2✉}, А. Ю. Строгонов², Кйеу Туан Анх³

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

² Российский государственный университет нефти и газа (национальный исследовательский университет) имени И. М. Губкина (Россия, 119991, г. Москва, Ленинский просп., 65, корп. 1)

³ Институт пожарной безопасности Министерства общественной безопасности Вьетнама (Вьетнам, 100000, г. Ханой, ул. Йет Кйеу, 44)

РЕЗЮМЕ

Введение. Отмечена актуальность и важность учета требований к пожарной безопасности (ПБ) на производственных объектах топливно-энергетического комплекса (ТЭК) в рабочем процессе. Планирование мероприятий по обеспечению ПБ следует учитывать при разработке виртуальных двойников данных объектов, принимая во внимание требования к информационной безопасности (ИБ). Выделена необходимость учета стратегических целей при подобном моделировании. Для повышения качества создаваемых виртуальных прототипов предложен аппарат стратегического планирования, позволяющий учесть множество рисков, определенных экспертной группой. Целью работы является получение модели, с помощью которой можно оценить особенности обеспечения ПБ и ИБ, а также связанные с ним риски.

Методы исследования. Вначале определена стратегическая цель, связанная с выполнением производственных функций объекта ТЭК, от которых зависит получение прибыли. Для упрощения модели опасные факторы распределили по независимым категориям: риски негативных последствий, связанных с ПБ и ИБ, загрязнением среды, остановкой технологического процесса из-за внешних проверок. Для каждой категории представлен вывод экспертного и расчетного значений. Экспертные оценки могут быть получены с помощью обратнoсимметричных матриц парного сравнения, а расчетные — с использованием градуировки категорий по шкале ущерба. Описана функция вероятности, соотнесенная с каждым участком объекта ТЭК. Так рассчитывается негативное влияние опасных факторов.

Результаты исследования. Учитывая выделенную в исследовании функцию вероятности, можно получить матрицу распределения влияния опасных факторов на объект ТЭК. Описанную выше процедуру применяем для второго и третьего уровней иерархии влияния. Второй уровень включает опасные факторы, третий — мероприятия по предотвращению их влияния. Итоговым результатом является получение распределения влияния мероприятий по участкам объекта ТЭК.

Заключение. Отмечены преимущества технологии цифровых двойников при планировании ПБ объектов ТЭК. Применение стратегического планирования позволяет разработать модель цифрового двойника, учитывающую влияние мероприятий на достижение целей обеспечения ПБ и ИБ.

Ключевые слова: иерархия; математическая модель; метод анализа иерархий; решающая матрица; экспертная оценка; стратегическое планирование; производственная функция; функция вероятности; информационная безопасность; автоматизация.

Для цитирования: Топольский Н. Г., Самарин И. В., Строгонов А. Ю., Кйеу Туан Анх. Модель оценки влияния мероприятий пожарной безопасности на агрегатную цель для цифровых двойников объектов ТЭК // Пожаровзрывобезопасность/Fire and Explosion Safety. — 2019. — Т. 28, № 3. — С. 50–58. DOI: 10.18322/PVB.2019.28.03.50-58.

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

Model of an assessment of impact of fire safety measures on the aggregate target for the digital twins of fuel and energy complex facilities

© Nikolay G. Topolskiy¹, Ilya V. Samarin^{2✉}, Andrey Yu. Strogonov², Kieu Tuan Anh³

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

² Gubkin Russian State University of Oil and Gas (National Research University) (Leninskiy Avenue, 65, Bldg. 1, Moscow, 119991, Russian Federation)

³ Institute of Fire Safety, Vietnam Ministry of Public Security (Yet Kieu St., 44, Hanoi, 100000, Vietnam)

ABSTRACT

Introduction. Introductory part of this paper considers the actuality and importance of taking into account the requirements for fire safety (FS) at the production facilities of the fuel and energy complex (FEC) in the working process. The process of development of virtual twins of these objects should include planning of FS measures considering the requirements for information security (IS). There are noted the necessity of definition of strategic goals in such modeling. Authors propose strategic planning apparatus to improve the quality of created virtual prototypes. This kind of planning allows to take into account the many risks identified by the expert group. The objective of scientific research is to obtain a model by which it is possible to assess the features of the provision of FS and IS.

Methodology. The strategic goal associated with the performance of the production functions of the FEC facility, on which profit depends, is defined. To simplify the model dangerous factors were distributed into independent categories: risks of negative consequences connected with FS and IS, environmental pollution and process stoppage due to external inspections. The output of the expert and calculated values is presented for each category. Expert evaluations can be obtained using inverse symmetric pairwise comparison matrices and calculated evaluations using category grading on the damage scale. The probability function correlates with each part of the FEC facility. The negative impact of the dangerous factors is calculated that way.

Results. It is possible to obtain a matrix of distribution of influence of dangerous factors using the probability function selected in the study. The above procedure is used for the second and third levels of the hierarchy of influence. The second level includes factors, the third — measures to prevent the influence of dangerous factors. The final result is obtaining the distribution of the impact of activities on the parts of the FEC facility.

Conclusion. Finally, it was noted advantages of digital twin technology in planning FS of facilities of the FEC. The use of strategic planning allows to develop a digital twin model, taking into account the impact of activities on the achievement of the objectives of ensuring of FS and IS.

Keywords: hierarchy; mathematical model; analytic hierarchy process; decision matrix; expert evaluation; strategic planning; production function; probability function; information security; automation.

For citation: N. G. Topolskiy, I. V. Samarin, A. Yu. Strogonov, Kieu Tuan Anh. Model of an assessment of impact of fire safety measures on the aggregate target for the digital twins of fuel and energy complex facilities. *Pozharovzryvobezopasnost/Fire and Explosion Safety*, 2019, vol. 28, no. 3, pp. 50–58 (in Russian). DOI: 10.18322/PVB.2019.28.03.50-58.

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

Введение

Требования к пожарной безопасности (ПБ) объектов топливно-энергетического комплекса (ТЭК) всегда были и по сей день остаются наиболее важными для их деятельности. Профилактические и иные работы в этом направлении необходимо тщательно планировать и проводить в соответствии с разрабатываемыми для этих целей документами. Выполнение требований стандартизации в сфере управления безопасностью позволит эффективно справиться с непредвиденными событиями на производственном объекте [1]. И несмотря на то что в результате функционирования тех или иных объектов возможно возникновение кризисных ситуаций, не учтенных стандартами, наличие базы, характеризующей всевозможные меры безопасности, крайне важно. Так, например, с учетом особых характеристик углеводородов мерам по предотвращению пожаров и взрывов на объектах нефтяной отрасли уделяется особое внимание [2].

Согласно прогнозам компании Gartner [3] к 2021 г. половина крупных промышленных предприятий будет использовать цифровые двойники при решении широкого спектра производственных задач, что в свою очередь может привести к повышению эффективности управления и планирования на 10 %. В связи с активным внедрением в настоящее время систем виртуальных производств, инструментов “Индустрии 4.0” на объектах ТЭК [4, 5] при создании их виртуальных двойников следует не только предус-

матривать вопросы планирования и проведения мероприятий по обеспечению ПБ, но и тесно увязывать их с информационной безопасностью (ИБ) [6]. Требования ИБ должны учитываться наряду с иными требованиями при моделировании работы цифровых прототипов. Однако следует принимать во внимание, что требования по ИБ к цифровым объектам защиты на сегодняшний день строго не обозначены и не стандартизированы [4]. Согласно паспорту национальной программы “Цифровая экономика Российской Федерации” лишь к началу 2022 г. предусмотрена реализация проекта по разработке стандартов ИБ в системах, реализующих технологии искусственного интеллекта [7]. Информационная безопасность может выступать в свою очередь драйвером развития технологий, совмещающих виртуальное и реальное производства, ведь отражение производственных процессов в виде подобных моделей неизбежно приводит к проблеме утечки информации. В связи с этим данную проблему следует решать в первую очередь.

В работе [8] были проанализированы особенности управления проведением мероприятий ПБ на объектах ТЭК, подходы к оценке качества принятия решений в автоматизированной системе пожаровзрывобезопасности. В настоящем исследовании описан механизм планирования мероприятий по обеспечению ПБ при разработке виртуальных двойников данных объектов с учетом необходимых стратегических целей.

Моделированию с помощью инструментов “Индустрии 4.0” подвергаются все (в том числе еще не созданные) участки (цеха, отдельные производственные линии, производственные участки, отдельные рабочие места). Подобное моделирование позволяет учесть многие возможные обстоятельства их работы и на этапе проектирования выявить неточности, ошибки, расхождений, что даст возможность в будущем улучшить различные аспекты их функционирования [9, 10]. Такой процесс тесно связан с обработкой большого объема накопленной информации (больших данных). Принятие решений все чаще зависит от точности накапливаемых данных и их анализа. Использование больших данных в промышленности может иметь ценность только в случае специальной обработки их методами, отличающимися от традиционных. Важно различать функции и задачи цифровых двойников и технологии больших данных [11]. Дополняя друг друга, на начальном этапе развития “Индустрии 4.0” они могут стать эффективными инструментами при моделировании пожарной безопасности на объектах ТЭК. Однако в России процесс внедрения подобных технологий только начинает набирать обороты: устаревшее оборудование не позволяет получать требуемый для анализа и моделирования объем информации, а инфраструктура не всегда готова обрабатывать такие данные.

Основа подобных моделей обычно включает подходы, связанные со взглядами на производственный процесс разработчиков инструментов моделирования производств [12, 13]. В получаемых виртуальных моделях зачастую достигаются частные, привязанные непосредственно к производственному процессу цели, а важные в стратегическом плане цели высших руководителей объектов ТЭК и их инвесторов при этом не учитываются.

Вместе с тем реальные условия эксплуатации созданных с помощью подобных цифровых программных оболочек виртуальных объектов ТЭК требуют более гибких средств моделирования, которые бы позволяли учитывать все необходимые стратегические цели. Поэтому для повышения качества таких моделей и внедрения передового отечественного опыта работы в области управления производственными процессами следует внедрять в уже созданные инструменты новые алгоритмы и модели, учитывающие различные стратегические цели при моделировании любых работ на виртуальных объектах ТЭК. Логично предположить, что этим целям в полной мере соответствует математический аппарат стратегического планирования, позволяющий на основе анализа иерархий, экспертных оценок и решающих матриц [14, 15] определять степень влияния отдельных мероприятий на поставленные стра-

тегические цели, снижая тем самым риски ошибочных инвестиций, возникновения коллизий и ситуаций, связанных с принятием рисков, в том числе угроз ИБ.

Для непосредственного включения заявленных задач в цифровые двойники объектов ТЭК в их цифровые модели, помимо мероприятий по обеспечению информационной и пожарной безопасности на объектах ТЭК, следует внести отдельные внутренние процедуры руководителей соответствующих подразделений, которые также содержат задачи обеспечения ПБ и ИБ на закрепленных за ними объектах. Такие процедуры обычно реализуются на уровне подчиненных подобъектов и бывают связаны с проведением экологического мониторинга, непосредственно связанного с ПБ, и проверками их уполномоченными государственными органами. В связи с тем что перед каждой проверкой необходимо разработать план и программу ее проведения, а также с тем, что проводимые в рамках таких проверок запланированные мероприятия влияют на производственный процесс объектов ТЭК в целом, их учет в виртуальных моделях объектов ТЭК крайне важен для достижения стратегических целей, поставленных перед управляющими инвесторами объекта. Как правило, для каждой проверки такие планы и программы разрабатываются на среднесрочный и долгосрочный периоды.

Целью исследования является построение математической модели, позволяющей при разработке цифровых двойников производственных объектов ТЭК учитывать особенности обеспечения ПБ, а также угроз ИБ и требований к ней. Для решения обозначенной авторами задачи использован инструмент стратегического планирования, учитывающий разветвленный характер категорий факторов, влияющих на возникновение опасных ситуаций. Поэтапно определяются экспертные оценки негативно-го влияния выделенных факторов с помощью обратносимметричных матриц парного сравнения [16]. Описан механизм получения трехуровневой иерархии влияния. Используя отдельные элементы последнего уровня, можно оценить воздействие опасных факторов на общую защищенность участка объекта ТЭК.

Методы исследования

Для формирования учитывающей иерархию угроз ПБ и ИБ, иерархию требований экологического мониторинга и проверяющих организаций математической модели, которую можно было бы использовать в цифровом двойнике объекта ТЭК, понадобится определить показатели влияния перечисленных особенностей на цели, поставленные перед объектом ТЭК инвесторами. Формирование таких пока-

зателей из-за множества подлежащих учету факторов в цифровых моделях объектов ТЭК следует вести в автоматизированном режиме, что и было предложено по ряду позиций отечественными специалистами по разработке специального программного обеспечения (СПО) [17–19].

Будем здесь и далее рассматривать в качестве стратегической цели для объекта ТЭК выполнение его прямых производственных функций, связанных с получением прибыли (при производстве продукции или обеспечении услуг). Для упрощения расчетов будем считать, что производственные функции, связанные с объектом ТЭК, характеризуют некоторую заданную прибыль, которую примем равной 1. Фактически влияние факторов на данную величину будем рассматривать как произведение возможного ущерба, рассчитанного в процентах от общей стоимости объекта ТЭК, на вероятность возникновения опасного события, при котором данный фактор реализован.

Для упрощения описания подхода при построении количественной модели расчета с применением методов стратегического планирования по аналогии с описываемым в [20] графом сгруппируем по категориям необходимые для учета опасные факторы, которые способствуют появлению опасных ситуаций на объекте ТЭК. Для более точного расчета в дальнейшем потребуется учесть физическое расположение опасных событий и зон их негативного влияния на объекте ТЭК.

Будем группировать выбранные для расчета опасные факторы по следующим категориям рисков негативных последствий, связанных:

- с пожарной безопасностью;
- с информационной безопасностью;
- с загрязнением окружающей среды;
- с частичной (или полной) остановкой либо консервацией производственного процесса на период работы проверяющих или аудиторов.

Следует считать данные группы факторов независимыми. Это упростит расчет и позволит сделать его более наглядным.

Учитывая, что каждая из приведенных категорий факторов представляет собой иерархическую структуру, или неориентированный граф, для каждой из вершин которого вводится своя иерархия требований (аналогично методу анализа иерархий [14, 21, 22]), при построении детальной количественной схемы процесса негативного влияния опасных факторов перечисленные категории следует раскрыть и дополнить. Однако при решении поставленной математической задачи в общем виде общее количество указанных факторов, которые могут оказывать негативное влияние на поставленную стратегическую цель, значения не имеет.

Занесем в таблицу перечисленные категории, обозначения факторов, их значения, которые могут быть определены экспертами, а также вероятные значения, полученные на основе математического расчета. Общую формулу расчета негативного влияния факторов указанных категорий приведем ниже.

Экспертная оценка определяется на основании обратносимметричных матриц парных сравнений [16], которые содержат в качестве значений величины присвоенных им экспертами оценок. Для каждого из факторов в целях повышения точности экспертных оценок строится своя обратносимметричная матрица (1).

Матрица P^i (1) построена для i -й категории факторов влияния:

$$P^i = \begin{pmatrix} p_{11}^i & \cdots & p_{1m}^i \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ p_{m1}^i & \cdots & p_{mm}^i \end{pmatrix}. \quad (1)$$

Значениями матрицы P^i являются оценки, данные каждым из m экспертов в контексте заданной стратегической цели. Каждая из матриц P^i обратносимметрична. Это значит, что

$$p_{jk}^i = 1/p_{kj}^i. \quad (2)$$

Элементами данной матрицы являются величины p_{jk}^i экспертно определяемых отношений значимостей k -го фактора по отношению к значимости j -го фактора. Данные величины используются затем для получения собственных значений матриц типа (1) для каждого из опасных факторов [14]. Будем считать, что для матрицы P^i получено значение π_i .

Расчетное значение для данной категории факторов можно получить на основе градуировки перечисленных категорий факторов по некоторой шкале ущерба. Выбрав все необходимые оценки по шкале, имеем:

$$\sum_{i=1}^4 O_i = O, \quad (3)$$

где O_i — значение по шкале для i -й категории факторов влияния;

O — суммарное значение факторов.

Тогда итоговое значение опасности D_i для i -й категории составит:

$$D_i = O_i / O. \quad (4)$$

Следовательно,

$$\sum_{i=1}^4 D_i = 1. \quad (5)$$

Теперь у нас есть все данные для таблицы.

Объект ТЭК делится на участки. Для каждого участка рассчитывается влияние сначала категории

Категории факторов негативного влияния на объект ТЭК

Categories of negative influence factors on the fuel and energy complex facility

№ п/п No.	Обозначение категории Category designation	Категория факторов опасного влияния Category of factors of dangerous impact	Значение влияния Impact value	
			полученное при экспертной оценке obtained by expert evaluation	итоговое final
1	μ_1	Риски негативных последствий, связанных с ПБ The risks of negative consequences associated with the fire safety	π_1	D_1
2	μ_2	Риски негативных последствий, связанных с ИБ The risks of negative consequences associated with the information security	π_2	D_2
3	μ_3	Риски негативных последствий, связанных с загрязнением окружающей среды Risks of negative consequences associated with environmental pollution	π_3	D_3
4	μ_4	Риски негативных последствий, связанных с частичной (или полной) остановкой либо консервацией производственного процесса на период работы проверяющих или аудиторов Risks of negative consequences associated with partial (or complete) shutdown or conservation of the production process for the period of work of inspectors or auditors	π_4	D_4

факторов. Для этого ему ставится в соответствие функция вероятности

$$A(\mu_j) = B + \sum_{i=1}^Q a_i D_i, \quad (6)$$

где Q — количество категорий факторов влияния для расчета;

μ_i — категория факторов влияния;

a_i — наличие на выбранном участке категории фактора влияния;

$$a_i = \begin{cases} 0, & \text{если;} \\ 1, & \text{нет,} \end{cases} \quad (7)$$

B — коэффициент ущерба;

$$B = B_{\text{уч}} / B_{\text{max}}; \quad (8)$$

$B_{\text{уч}}$ — максимально возможный ущерб от всех категорий факторов влияния на данном участке;

B_{max} — максимально возможный ущерб от всех категорий факторов влияния на всем объекте ТЭК.

Анализ результатов

В результате расчета можно получить матрицу распределения категорий факторов влияния на объекте ТЭК:

$$A(\mu) = \begin{pmatrix} A(\mu)_{11} & \cdots & A(\mu)_{1M} \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ A(\mu)_{Q1} & \cdots & A(\mu)_{QM} \end{pmatrix}, \quad (9)$$

где M — число участков;

Q — число категорий факторов влияния.

Для каждой из категорий факторов описанную процедуру следует повторить, уточнив, какие именно

факторы в нее входят. Например, для рисков, связанных с ПБ, следует учитывать факторы, часть из которых приведена ниже:

- близость объекта ТЭК к линиям электрических передач высокого напряжения;
- плотность размещения подключений на единицу площади;
- плотность электрических реле на единицу площади объекта ТЭК;
- ведение профилактических работ персоналом на открытых участках объекта ТЭК, где есть пары горючих материалов;
- ведение работ персоналом с применением металлического ручного и электрического инструмента в закрытых взрыво- и пожароопасных помещениях, имеющих железные покрытия, и т. п.

Для категории рисков, связанных с ИБ, следует рассматривать примерно такие факторы:

- оценочное значение нагрева горючих материалов при работе Wi-Fi-соединений на объекте ТЭК;
- количество правильно и корректно настроенных штатных средств поддержания ИБ объекта ТЭК;
- количество технических каналов возможной утечки информации при применении датчиков состояния объекта ТЭК для построения его виртуального двойника;
- количество вероятных способов несанкционированного доступа к элементам передачи данных от датчиков состояния объекта ТЭК при реализации виртуального двойника объекта ТЭК и т. п.

Для категории негативных последствий, связанных с загрязнением окружающей среды, необходимо учесть ориентировочно такие факторы:

- объем горючих материалов, хранящихся на объекте ТЭК;
- объем горючих материалов в открытых резервуарах;
- количество резервуаров, в которых хранение горючих и опасных веществ осуществляется открытым способом;
- дистанция от каждого из таких резервуаров до границы контролируемой зоны объекта ТЭК;
- износ очистных сооружений по каждому из объектов ТЭК и т. п.

Для категории негативных последствий, связанных с частичной (или полной) остановкой либо консервацией производственного процесса на период работы проверяющих или аудиторов, необходимо учесть следующие факторы:

- количество непринятых в обработку горючих материалов;
- нормо-часы персонала, обслуживающего резервуары с горючими материалами, потерянные в результате выполнения ими действий, не связанных с профессиональными обязанностями;
- прямые потери от простоя проверяемых участков;
- косвенные потери, связанные с ликвидацией последствий простоя на участках, где переработка должна идти непрерывно, и т. п.

Для каждой из перечисленных категорий (в нашем случае четырех, но может быть и больше) значения по факторам влияния заносятся в отдельные таблицы. Будем называть их таблицами 2-го уровня (см. рисунок).

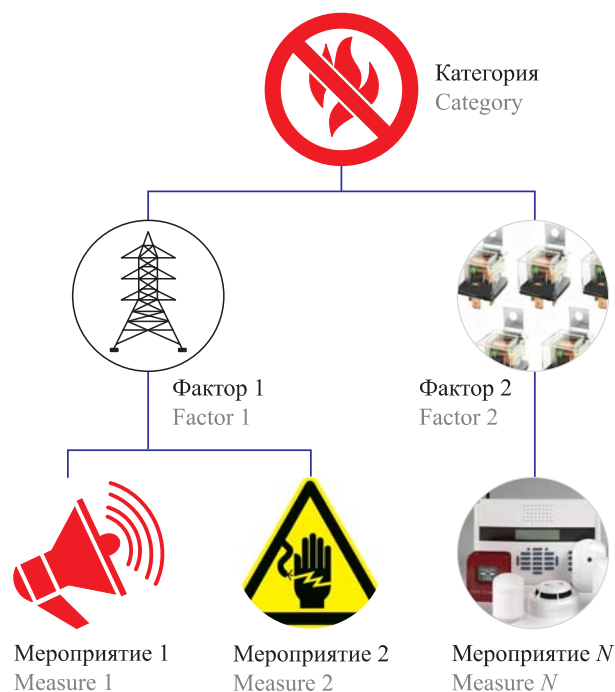
Далее для каждой из позиций таблиц 2-го уровня описанная выше последовательность действий повторяется. В итоге по каждой из категорий получается распределение влияния опасных факторов.

Затем для каждого из факторов формируется таблица, содержащая мероприятия по предотвращению влияния опасных факторов, включенных в планы на отдельных участках объекта ТЭК [21, 22]. Эти таблицы, формируемые для каждой позиции таблиц 2-го уровня, следует считать таблицами 3-го уровня. Выполняя для них действия в аналогичной последовательности, можно получить распределение влияния мероприятий по участкам объекта ТЭК.

Как уже говорилось выше, количество категорий факторов влияния может быть различным. Если полагать его равным N , то собственные значения матриц категорий факторов влияния π_i в общем виде образуют вектор собственных значений матриц 1-го уровня (см. таблицу, графа 4):

$$\pi^I = \{\pi_1^I, \pi_2^I, \dots, \pi_N^I\}, \quad (10)$$

где π_i^I — собственное значение матрицы категорий факторов.



Пример иерархии влияния
Example of a hierarchy of influence

Аналогичным образом рассчитываются векторы собственных значений для таблиц 2-го и 3-го уровней.

Значение влияния отдельного мероприятия можно рассчитать исходя из предположения об агрегатном показателе влияния, который можно вычислить, последовательно умножая вектор типа (10) на матрицу типа (9) для каждого из уровней иерархии (см. рисунок). В этом случае итоговая матрица будет содержать влияние мероприятия на общую защищенность участка объекта ТЭК.

Заключение

Проблема обеспечения приемлемого уровня пожаровзрывобезопасности стратегически важных производственных объектов ТЭК довольно сложна и зависит от многих факторов. Усложнение, информатизация технологических процессов влекут за собой необходимость создания новых эффективных средств для повышения качества управления объектом. Одним из таких средств является технология цифровых двойников. Планирование пожарной безопасности с помощью данной технологии способно предусмотреть скрытые, неявные факторы влияния, повысить скорость планирования и, как следствие, оперативность принятия решения. Представляя собой полезный, важный объект управления, виртуальная модель связана с угрозами информационной безопасности. Перечень мер по защите цифровых двойников, требования по ИБ в настоящее время строго не определены.

В работе предложен вариант применения методов стратегического планирования при анализе влияния отдельных мероприятий на достижение целей обеспечения пожарной и информационной

безопасности на объектах ТЭК, позволяющий создать математическую модель, которую можно использовать при разработке цифровых двойников указанных объектов.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Antonsen S., Skarholt K., Ringstad A. J.* The role of standardization in safety management — A case study of a major oil & gas company // *Safety Science*. — 2012. — Vol. 50, No. 10. — P. 2001–2009. DOI: 10.1016/j.ssci.2011.11.001.
2. *Dawoud S. M.* Fire protection in the petroleum industry // *SPE Annual Technical Conference and Exhibition* (11–14 November 2007, Anaheim, California, USA). DOI: 10.2118/110521-ms.
3. *Petty Christy.* Prepare for the impact of digital twins. — September 18, 2017. URL: <https://www.gartner.com/smarterwithgartner/prepare-for-the-impact-of-digital-twins/> (дата обращения: 16.02.2019).
4. “Цифровые двойники” как новый объект защиты в условиях формирования цифровой экономики / Центр стратегических оценок и прогнозов. — 15 июня 2018. URL: <http://csef.ru/ru/politica-i-geopolitica/445/> (дата обращения: 10.02.2019).
5. *Prakash J.* Digital twins define oil & gas 4.0. URL: <https://www.arcweb.com/blog/digital-twins-define-oil-gas-40> (дата обращения: 16.02.2019).
6. *Thames L., Schaefer D.* (eds). *Cybersecurity for industry 4.0*. — Cham : Springer International Publishing AG, 2017. — 265 p. DOI: 10.1007/978-3-319-50660-9.
7. Паспорт национальной программы “Цифровая экономика Российской Федерации”. URL: <https://digital-api.ac.gov.ru/upload/iblock/ef4/Паспорт%20нацпрограммы%20с%20сайта%20правительства.pdf> (дата обращения: 10.02.2019).
8. *Топольский Н. Г., Самарин И. В., Строгонов А. Ю.* Методика оценки эффективности управления мероприятиями пожарной безопасности на объектах ТЭК в составе автоматизированной системы поддержки управления // *Пожаровзрывобезопасность/Fire and Explosion Safety*. — 2018. — Т. 27, № 12. — С. 19–26. DOI: 10.18322/PVB.2018.27.12.19-26.
9. *Zhong R. Y., Xu X., Klotz E., Newman S. T.* Intelligent manufacturing in the context of Industry 4.0 : A review // *Engineering*. — 2017. — Vol. 3, No. 5. — P. 616–630. DOI: 10.1016/J.ENG.2017.05.015.
10. *Vaidya S., Ambad P., Bhosle S.* Industry 4.0 — A glimpse // *Procedia Manufacturing*. — 2018. — Vol. 20. — P. 233–238. DOI: 10.1016/j.promfg.2018.02.034.
11. *Qi Q., Tao F.* Digital twin and big data towards smart manufacturing and Industry 4.0 : 360 degree comparison // *IEEE Access*. — 2018. — Vol. 6. — P. 3585–3593. DOI: 10.1109/ACCESS.2018.2793265.
12. *Petrash R., Hentschke R.* Process modeling for Industry 4.0 applications: Towards an Industry 4.0 process modeling language and method // *13th International Joint Conference on Computer Science and Software Engineering (JCSSE)* (13–15 July 2016, Khon Kaen, Thailand). — IEEE, 2016. — P. 1–5. DOI: 10.1109/JCSSE.2016.7748885.
13. *Zeulka F., Marcon P., Vesely I., Sajdl O.* Industry 4.0 — An introduction in the phenomenon // *IFAC-PapersOnLine*. — 2016. — Vol. 49, No. 25. — P. 8–12. DOI: 10.1016/j.ifacol.2016.12.002.
14. *Саати Т.* Принятие решений. Метод анализа иерархий / Пер. с англ. — М. : Радио и связь, 1993. — 278 с.
15. *Saaty T. L.* Decision making with the analytic hierarchy process // *International Journal of Services Sciences*. — 2008. — Vol. 1, No. 1. — P. 83–98. DOI: 10.1504/IJSSCI.2008.017590.
16. *Антонов А. В.* Системный анализ : учеб. для вузов. — М. : Высшая школа, 2004. — 454 с.
17. *Бутузов С. Ю., Крючков А. В., Самарин И. В.* Устойчивость программного обеспечения в автоматизированной системе пожаровзрывобезопасности // *Современная наука: актуальные проблемы теории и практики. Серия: Естественные и технические науки*. — 2018. — № 9. — С. 50–54.
18. *Крючков А. В.* Спецификации требований к специальному программному обеспечению в виде паспорта информационной единицы хранения // *Технологии техносферной безопасности*. — 2015. — № 6(64). — С. 175–180.
19. *Топольский Н. Г., Крючков А. В., Грачев Д. С., Михайлов К. А., Нгуен Ле Зуи.* Синтез типовых программных модулей автоматизированных систем пожаровзрывобезопасности // *Технологии техносферной безопасности*. — 2017. — № 6(76). — С. 56–64.
20. *Самарин И. В., Строгонов А. Ю.* Модель оценки пожарной безопасности на объектах топливно-энергетического комплекса с помощью их временных характеристик на графах стратегического планирования в составе автоматизированной системы поддержки управления // *Труды Российского государственного университета нефти и газа им. И. М. Губкина*. — 2018. — № 4(293). — С. 143–154.

21. Самарин И. В. Формализация задачи обоснования среднесрочного плана деятельности для построения автоматизированной системы управления стратегического планирования на предприятии // Инновации и инвестиции. — 2014. — № 4. — С. 177–183.
22. Самарин И. В., Фомин А. Н. Стратегическое планирование на предприятии: применение метода анализа иерархий для анализа системы целевых установок // Инновации и инвестиции. — 2014. — № 6. — С. 132–141.

REFERENCES

1. S. Antonsen, K. Skarholt, A. J. Ringstad. The role of standardization in safety management — A case study of a major oil & gas company. *Safety Science*, 2012, vol. 50, no. 10, pp. 2001–2009. DOI: 10.1016/j.ssci.2011.11.001.
2. S. M. Dawoud. Fire protection in the petroleum industry. In: *SPE Annual Technical Conference and Exhibition (11–14 November, 2007, Anaheim, California, USA)*. DOI: 10.2118/110521-ms.
3. Pettey Christy. *Prepare for the impact of digital twins*. September 18, 2017. Available at: <https://www.gartner.com/smarterwithgartner/prepare-for-the-impact-of-digital-twins/> (Accessed 16 February 2019).
4. Center for Strategic Assessment and Forecasts. “*Digital doubles*” as the new object of protection in the conditions of formation of the digital economy. 15 June 2018. Available at: <http://csef.ru/en/politica-i-geopolitica/445/czifrovye-dvojniki-kak-novyy-obekt-zashhity-v-usloviyah-formirovaniya-czifrovoy-ekonomiki-8520> (Accessed 10 February 2019).
5. J. Prakash. *Digital twins define oil & gas 4.0*. Available at: <https://www.arcweb.com/blog/digital-twins-define-oil-gas-40> (Accessed 16 February 2019).
6. L. Thames, D. Schaefer (eds). *Cybersecurity for Industry 4.0*. Cham, Springer International Publishing AG, 2017. 265 p. DOI: 10.1007/978-3-319-50660-9.
7. *Passport of the national program “Digital economy of the Russian Federation”* (in Russian). Available at: <https://digital-api.ac.gov.ru/upload/iblock/ef4/Паспорт%20нацпрограммы%20с%20сайта%20правительства.pdf> (Accessed 10 February 2019).
8. N. G. Topolskiy, I. V. Samarina, A. Yu. Strogonov. Technique of an assessment of efficiency of management of fire safety at facilities of fuel and energy complex using by computer-aided support control system. *Pozharovzryvbezopasnost/Fire and Explosion Safety*, 2018, vol. 27, no. 12, pp. 19–26 (in Russian). DOI: 10.18322/PVB.2018.27.12.19-26.
9. R. Y. Zhong, X. Xu, E. Klotz, S. T. Newman. Intelligent manufacturing in the context of Industry 4.0: A review. *Engineering*, 2017, vol. 3, no. 5, pp. 616–630. DOI: 10.1016/J.ENG.2017.05.015.
10. S. Vaidya, P. Ambad, S. Bhosle. Industry 4.0 — A glimpse. *Procedia Manufacturing*, 2018, vol. 20, pp. 233–238. DOI: 10.1016/j.promfg.2018.02.034.
11. Q. Qi, F. Tao. Digital twin and big data towards smart manufacturing and Industry 4.0: 360 degree comparison. *IEEE Access*, 2018, vol. 6, pp. 3585–3593. DOI: 10.1109/ACCESS.2018.2793265.
12. R. Petrasch, R. Hentschke. Process modeling for Industry 4.0 applications: Towards an Industry 4.0 process modeling language and method. In: *13th International Joint Conference on Computer Science and Software Engineering (JCSSE) (13–15 July 2016, Khon Kaen, Thailand)*. IEEE, 2016, pp. 1–5. DOI: 10.1109/JCSSE.2016.7748885.
13. F. Zezulka, P. Marcon, I. Vesely, O. Sajdl. Industry 4.0 — An introduction in the phenomenon. *IFAC-PapersOnLine*, 2016, vol. 49, no. 25, pp. 8–12. DOI: 10.1016/j.ifacol.2016.12.002.
14. T. L. Saaty. *The analytic hierarchy process*. New York, McGraw-Hill, 1980 (Russ. ed.: *Prinyatiye resheniy. Metod analiza iyerarkhiy*. Moscow, Radio i svyaz Publ., 1993. 278 p.).
15. T. L. Saaty. Decision making with the analytic hierarchy process. *International Journal of Services Sciences*, 2008, vol. 1, no. 1., pp. 83–98. DOI: 10.1504/IJSSCI.2008.017590.
16. A. V. Antonov. *Sistemnyy analiz* [System analysis]. Moscow, Vysshaya shkola Publ., 2004. 454 p. (in Russian).
17. S. Yu. Butuzov, A. V. Kryuchkov, I. V. Samarina. The stability of the software in the automated system of fire and explosion. *Sovremennaya nauka: aktualnyye problemy teorii i praktiki. Seriya: Estestvennyye i tekhnicheskkiye nauki / Modern Science: Actual Problems of Theory and Practice. Series: Natural and Technical Sciences*, 2018, no. 9, pp. 50–54 (in Russian).
18. A. V. Kruchkov. Specifications requirements for special software as information storage unit passport. *Tekhnologii tekhnosfernoy bezopasnosti / Technology of Technosphere Safety*, 2015, no. 6(64), pp. 175–180 (in Russian).
19. N. G. Topolskiy, A. V. Kruchkov, D. S. Grachev, K. A. Mikhaylov, Nguyen Le Zuy. Synthesis of typical software modules for computer-aided fire-explosion safety system. *Tekhnologii tekhnosfernoy bezopasnosti / Technology of Technosphere Safety*, 2017, no. 6(76), pp. 56–64 (in Russian).

20. I. V. Samarin, A. Yu. Strogonov. Model of evaluation of fire safety at fuel and energy complex facilities using temporal characteristics from graphs of strategic planning using automated control system. *Trudy Rossiyskogo gosudarstvennogo universiteta nefti i gaza imeni I. M. Gubkina / Proceedings of Gubkin Russian State University of Oil and Gas*, 2018, no. 4(293), pp. 143–154 (in Russian).
21. I. V. Samarin. Formalization of the problem of the justification of the medium-term action plan to build the automated control system of strategic planning at the enterprise. *Innovatsii i investitsii / Innovation and Investment*, 2014, no. 4, pp. 177–183 (in Russian).
22. I. V. Samarin, A. N. Fomin. Strategic planning at the enterprise: application of a method of the analysis of hierarchies to analyze target system installations. *Innovatsii i investitsii / Innovation and Investment*, 2014, no. 6, pp. 132–141 (in Russian).

Поступила 20.02.2019; после доработки 15.04.2019; принята к публикации 23.04.2019
Received 20 February 2019; received in revised form 15 April 2019; accepted 23 April 2019

Информация об авторах

ТОПОЛЬСКИЙ Николай Григорьевич, д-р техн. наук, профессор, заслуженный деятель науки РФ, профессор кафедры информационных технологий, Академия ГПС МЧС России, г. Москва, Российская Федерация; ORCID: 0000-0002-0921-4764, Scopus Author ID: 6602393869, e-mail: ntopolskii@mail.ru

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

СТРОГОНОВ Андрей Юрьевич, аспирант кафедры автоматизации технологических процессов, Российский государственный университет нефти и газа (национальный исследовательский университет) имени И. М. Губкина, г. Москва, Российская Федерация; ORCID: 0000-0001-7994-5987

Кйеу Туан Ань, сотрудник отдела организации научных исследований, Институт пожарной безопасности Министерства общественной безопасности Вьетнама, г. Ханой, Вьетнам; адъюнкт кафедры информационных технологий, Академия ГПС МЧС России, г. Москва, Российская Федерация; ORCID: 0000-0001-8770-8543

Information about the authors

Nikolay G. TOPOLSKIY, Dr. Sci. (Eng.), Professor, Honoured Science Worker of Russian Federation, Professor of Department of Information Technology, State Fire Academy of Emercom of Russia, Moscow, Russian Federation; ORCID: 0000-0002-0921-4764, Scopus Author ID: 6602393869, e-mail: ntopolskii@mail.ru

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

Andrey Yu. STROGONOV, Postgraduate Student of Department of Automation of Technological Processes, Gubkin Russian State University of Oil and Gas (National Research University), Moscow, Russian Federation; ORCID: 0000-0001-7994-5987

Kieu Tuan Anh, Employee of Research Organization Office, Institute of Fire Safety, Vietnam Ministry of Public Security, Hanoi, Vietnam; Adjunct of Department of Information Technology, State Fire Academy of Emercom of Russia, Moscow, Russian Federation; ORCID: 0000-0001-8770-8543

Моделирование сети связи для управления действиями пожарных подразделений при тушении пожаров различной сложности

© М. В. Алешков¹, В. А. Басов¹, А. А. Колбасин¹,
А. А. Таранцев^{2, 3}, А. Л. Холостов^{1✉}

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

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

³ Институт проблем транспорта им. Н. С. Соломенко РАН (Россия, 199178, г. Санкт-Петербург, 12-я линия ВО, 13)

РЕЗЮМЕ

Введение. Вопросам организации радиосвязи на пожаре, как важной части процесса управления пожарными подразделениями, уделяется значительное внимание. Эффективность управления на пожаре во многом зависит от устойчивой работы сети радиосвязи, в которой в зависимости от сложности ситуации могут работать различные должностные лица, управляющие процессом тушения пожара.

Методы. Моделирование работы сети радиосвязи основывается на методах теории массового обслуживания. Составляется перечень из n состояний, в которых может пребывать сеть связи, и соответствующий граф переходов. С учетом общепринятых допущений на основе графа переходов составляется система из n дифференциальных уравнений, связывающих вероятности состояний и интенсивности перехода в эти состояния. На основе полученных решений оценивается эффективность работы сети радиосвязи.

Результаты. В статье рассматриваются три варианта, для которых описаны возможные состояния, построены графы и составлены системы уравнений. В первом варианте в сети радиосвязи взаимодействуют три должностных лица, во втором — четыре, в третьем — также четыре должностных лица, но с иной иерархией управления. В первых двух случаях получены аналитические решения для вероятностей состояний, для третьего предлагается решение с использованием численных методов. Для каждого случая определены критические состояния, влияющие на устойчивость управления. Полученные решения сопровождаются примерами.

Выводы. Показана возможность моделирования сети радиосвязи на пожаре, как важнейшего элемента управления действиями пожарных подразделений. Рассмотрены три варианта взаимодействия должностных лиц с использованием сети радиосвязи. Разработанные для рассматриваемых случаев математические модели позволяют определить вероятностные характеристики функционирования сети радиосвязи и оценить возможность появления критических режимов, влияющих на эффективность управления действиями пожарных подразделений.

Ключевые слова: радиосвязь на пожаре; управление тушением пожара; теория массового обслуживания; математическая модель; граф переходов.

Для цитирования: Алешков М. В., Басов В. А., Колбасин А. А., Таранцев А. А., Холостов А. Л. Моделирование сети связи для управления действиями пожарных подразделений при тушении пожаров различной сложности // Пожаровзрывобезопасность/Fire and Explosion Safety. — 2019. — Т. 28, № 3. — С. 59–69. DOI: 10.18322/PVB.2019.28.03.59-69.

✉ Холостов Александр Львович, e-mail: A.Holostov@academygps.ru

Modeling the communication network to control the action fire units to extinguish fires of various complexity

© Mikhail V. Aleshkov¹, Vadim A. Basov¹, Andrey A. Kolbasin¹,
Aleksandr A. Tarantsev^{2, 3}, Aleksandr L. Kholostov^{1✉}

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

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

³ Solomenko Institute of Transport Problems of the Russian Academy of Sciences (12th Line VO, 13, Saint Petersburg, 199178, Russian Federation)

ABSTRACT

Introduction. The organization of radio communication at the fire, as an important part of the fire units operating management, should be given a considerable attention. The effectiveness of fire units operating management depends largely on the steady of the radio network operation, in which, depending on the complexity of the situation, can work different officials who control the process of extinguishing the fire.

Methods. Modelling of radio network operation is based on Queuing theory methods. A list of n States in which the communication network and the corresponding transition graph can be compiled. Taking into account the generally accepted assumptions on the basis of the transition graph, a system of n differential equations connecting the probabilities of States and the intensity of the transition to these States is compiled. The stationary case is considered. Based upon the obtained solutions the efficiency of the radio network is estimated.

Results. The article presents three variants for which the possible States are described, graphs are constructed and systems of equations are composed. In the first variant, three officials interact inside the radio network, in the second, four officials interact. In the third variant the option of interaction between four fire units operating management with other hierarchy of management is considered. In the first two cases, analytical solutions for the States probabilities are obtained, for the third case, a solution using numerical methods is proposed. For each case, the critical States affecting the control stability are determined. The obtained solutions are followed by examples.

Conclusion. The possibility of modeling the radio communication network at the fire, as an important element of controlling of fire departments operating is demonstrated. Three variants of interaction between officials with use of a radio communication network are given. The mathematical models developed for the under consideration cases allow to estimate the probably characteristics of the radio network functioning. It allows us to assess the possibility of the probably of critical modes appearance that affect the effectiveness of the fire units operating management and the success his implementation.

Keywords: radio communication at the fire; manage fire-fighting; queueing theory; mathematical model; transition graph.

For citation: M. V. Aleshkov, V. A. Basov, A. A. Kolbasin, A. A. Tarantsev, A. L. Kholostov. Modeling the communication network to control the action fire units to extinguish fires of various complexity. *Pozharovzryvobezopasnost/ Fire and Explosion Safety*, 2019, vol. 28, no. 3, pp. 59–69 (in Russian). DOI: 10.18322/PVB.2019.28.03.59-69.

✉ Aleksandr Lvovich Kholostov, e-mail: A.Holostov@academygps.ru

Введение

Вопросам управления силами и средствами на пожаре и технологиям поддержки управленческих решений уделяется значительное внимание как в нашей стране [1–8], так и за рубежом [9–16].

Для того чтобы успешно руководить тушением пожара, необходимо эффективно использовать средства связи, обеспечивающие взаимодействие должностных лиц.

При этом необходимо решить ряд задач по обеспечению некоторых специфических характеристик сети связи, особое место среди которых занимают *доступность* и *пропускная способность*. Выполнение этих требований связано не только с применением средств связи, обладающих необходимыми техническими характеристиками, но и с правильной организацией связи на месте тушения пожара.

Эффективность управления на пожаре во многом зависит от устойчивой работы сети связи, в которой в зависимости от сложности ситуации могут находиться командиры звеньев (КЗ), руководитель тушения пожара (РТП), начальник штаба (НШ). При этом каждый из участников управления тушением пожара (абонент) должен иметь возможность незамедлительно связаться с другим абонентом в случае необходимости, а вероятность задержки (ожидания, если сеть связи занята) должна быть минимальной или не выходить за пределы допустимых значений.

Кроме того, от функционирования сети связи зависит не только успешность выполнения боевой задачи по тушению пожара, но и жизнь самих пожарных, уровень гибели которых достаточно высок не только в нашей стране, но и за рубежом [17].

К сожалению, вопросам моделирования связи на пожаре, являющейся важным средством управления, посвящено не так много работ [2, 6, 18, 19]. Остается неизученным вопрос об улучшении вышеупомянутых характеристик связи (и связанной с этим эффективности выполнения боевых действий по тушению пожара) с помощью организационных решений. Для этого, по нашему мнению, необходимо решить комплекс задач по определению вероятностных характеристик сети связи для различных вариантов ее организации. Эти варианты будут рассмотрены с учетом требований Боевого устава пожарной охраны, утвержденного в октябре 2017 г. приказом МЧС России и определяющего порядок организации тушения пожаров и проведения аварийно-спасательных работ. Для достижения поставленной цели необходимо решить следующие задачи:

- описать возможные, наиболее распространенные варианты взаимодействия должностных лиц;
- разработать математические модели для рассмотренных вариантов взаимодействия;
- составить уравнения, связывающие вероятности нахождения сети связи в различных состояниях с интенсивностью передаваемых сообщений;
- на основе решения уравнений получить вероятностные характеристики, позволяющие организовать рациональное использование сети связи должностными лицами, участвующими в тушении пожара.

Анализ работ [6, 18, 19] подтверждает, что для моделирования работы сети связи на пожаре с успехом может быть использована теория массового обслуживания (ТМО) [20].

Таблица 1. Состояния сети связи в соответствии с графом переходов на рис. 1**Table 1.** The status of the network connection in accordance with the transition graph in Fig. 1

$\{S\}$	Состояние / Status	Примечание / Note
S_0	Сеть свободна / Network is free	
S_1	НБУ ₁ ↔ РТП / The chief of site 1 with the officer in charge of fire extinguishing	
S_2	НБУ ₂ ↔ РТП / The chief of site 2 with the officer in charge of fire extinguishing	
S_3	НБУ ₁ ↔ РТП, НБУ ₂ → РТП / The chief of site 1 with the officer in charge of fire extinguishing, the chief of site 2 with the officer in charge of fire extinguishing	Задержка в управлении, критический случай
S_4	НБУ ₂ ↔ РТП, НБУ ₁ → РТП / The chief of site 2 with the officer in charge of fire extinguishing, the chief of site 1 with the officer in charge of fire extinguishing	Control delay, critical case

Примечание. В таблицах и на рисунках $A_1 \leftrightarrow A_2$ — абонент A_1 ведет переговоры с абонентом A_2 (два черных кружка связаны линией); $A_1 \rightarrow A_2$ — абонент A_1 ждет связи с абонентом A_2 (белый кружок связан линией с черным кружком).

Note. Symbols here and further on: $A_1 \leftrightarrow A_2$ — subscriber A_1 negotiate with subscriber A_2 (two black circles are connected by a line); $A_1 \rightarrow A_2$ — subscriber A_1 is waiting for connection with subscriber A_2 (white circle is connected by a line with a black circle).

Основные положения теории массового обслуживания применительно к моделированию сети связи

Основной принцип ТМО применительно к моделированию различных процессов, в частности управления тушением пожара, заключается в следующем. Составляется перечень из n состояний $\{S\}$, в которых может пребывать система (в данном случае сеть связи), и соответствующий граф переходов. С учетом известных допущений [20] на основе графа переходов составляется система из n обыкновенных дифференциальных уравнений:

$$\frac{dp_i}{dt} = f_i(\{p\}, \{\lambda\}, \{\mu\}), \quad i \in [0; n-1], \quad (1)$$

где t — время с момента начала работы (в данном случае сети связи);

$\{p\}$ — вероятности состояний $\{S\}$, причем $p_0 + p_1 + \dots + p_{n-1} = 1$;

$\{\lambda\}, \{\mu\}$ — интенсивности переходов.

Решение системы обыкновенных дифференциальных уравнений (1) с учетом начальных условий аналитическими или численными методами позволяет получить динамику вероятностей $\{p(t)\}$ состояний сети связи, сделать выводы об эффективности ее работы и сформулировать необходимые рекомендации по ее повышению.

Во многих случаях, полагая, что процессы приема-обслуживания вызовов установившиеся (т. е. $d\{p\}/dt = 0$), преобразуем систему обыкновенных дифференциальных уравнений (1) в систему алгебраических уравнений:

$$0 = f_i(\{p\}, \{\lambda\}, \{\mu\}), \quad i \in [0; n-1], \quad (2)$$

решение которой позволяет получить явные выражения для вероятностей состояний $\{p\}$.

Моделирование сети связи с использованием теории массового обслуживания

Случай первый. Если на пожаре организованы два боевых участка (БУ₁ и БУ₂), то в сети связи могут находиться РТП и начальники обоих боевых участков (НБУ₁ и НБУ₂). Такая сеть может пребывать в пяти состояниях S_0 – S_4 (табл. 1) с вероятностями p_0 – p_4 соответственно. Граф переходов представлен на рис. 1.

Система уравнений для стационарного случая в соответствии с графом на рис. 1 имеет вид:

$$\begin{cases} 0 = -(\lambda_1 + \lambda_2)p_0 + \mu_1 p_1 + \mu_2 p_2; \\ 0 = \lambda_1 p_0 - (\lambda_2 + \mu_1)p_1 + \mu_2 p_4; \\ 0 = \lambda_2 p_0 - (\lambda_1 + \mu_2)p_2 + \mu_1 p_3; \\ 0 = \lambda_2 p_1 - \mu_1 p_3; \\ 0 = \lambda_1 p_2 - \mu_2 p_4; \end{cases} \quad (3)$$

$$\sum_{i=0}^4 p_i = 1,$$

где λ_1, λ_2 — интенсивности необходимости переговоров между РТП и НБУ₁/НБУ₂ соответственно;

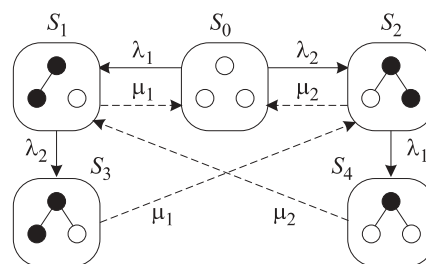


Рис. 1. Граф переходов для сети связи РТП (верхний кружок) с НБУ₁ (левый нижний кружок) и/или НБУ₂ (правый нижний кружок)

Fig. 1. The transition graph for the communication network: the officer in charge of fire extinguishing (upper circle) contacts the chief of site 1 (lower left circle) and/or the chief of site 2 (lower right circle)

μ_1, μ_2 — параметры, обратно пропорциональные среднему времени переговоров между РТП и НБУ₁/НБУ₂ соответственно;

$\{p\}$ — вероятности состояний $\{S\}$.

Для системы уравнений (3) получено точное аналитическое решение:

$$\begin{aligned} p_0 &= \frac{z}{z + x_1 \left(1 + \frac{\lambda_2}{\mu_1}\right) + x_2 \left(1 + \frac{\lambda_1}{\mu_2}\right)}; \\ p_1 &= p_0 \frac{x_1}{z}; \quad p_2 = p_0 \frac{x_2}{z}; \\ p_3 &= p_0 \frac{\lambda_2 x_1}{\mu_1 z}; \quad p_4 = p_0 \frac{\lambda_1 x_2}{\mu_2 z}, \end{aligned} \quad (4)$$

где $z = \lambda_1 \mu_1 + \lambda_2 \mu_2 + \mu_1 \mu_2$;

$x_1 = \lambda_1 (\lambda_1 + \lambda_2 + \mu_2)$;

$x_2 = \lambda_2 (\lambda_1 + \lambda_2 + \mu_1)$.

Критичными с точки зрения управления тушением будут состояния S_3 и S_4 . В первом случае РТП ведет переговоры с НБУ₁, а у НБУ₂ в это время тоже возникает необходимость связи с РТП, но он вынужден ожидать, что может привести к неконтролируемому развитию ситуации на втором БУ. Вероятность этого состояния p_3 . Аналогичная ситуация может возникнуть с вероятностью p_4 : РТП ведет переговоры с НБУ₂, а НБУ₁ вынужден ожидать связи с РТП.

Таким образом, общая вероятность критического состояния сети связи $p_{кр}$ может быть найдена из выражения

$$p_{кр} = p_3 + p_4 = \frac{\frac{\lambda_2 x_1}{\mu_1} + \frac{\lambda_1 x_2}{\mu_2}}{z + x_1 \left(1 + \frac{\lambda_2}{\mu_1}\right) + x_2 \left(1 + \frac{\lambda_1}{\mu_2}\right)}. \quad (5)$$

Пример 1. Если $\lambda_1 = 1$; $\lambda_2 = 2$; $\mu_1 = 30$; $\mu_2 = 40$, то $p_0 = 0,92027$; $p_1 = 0,03020$; $p_2 = 0,04636$; $p_3 = 0,00201$; $p_4 = 0,00116$; $p_{кр} = 0,00317$.

Следует иметь в виду, что при $\mu_1 = \mu_2 = \mu$ существует частное решение системы уравнений (3):

$$\begin{aligned} p_0 &= (1 + \alpha_1 + \alpha_2 + 2\alpha_1 \alpha_2)^{-1}; \\ p_1 &= \alpha_1 p_0; \\ p_2 &= \alpha_2 p_0; \\ p_3 &= p_4 = \alpha_1 \alpha_2 p_0, \end{aligned} \quad (6)$$

где α_1, α_2 — приведенные нагрузки;

$\alpha_1 = \lambda_1/\mu$; $\alpha_2 = \lambda_2/\mu$.

Пример 2. Если $\lambda_1 = 1$; $\lambda_2 = 2$; $\mu_1 = \mu_2 = 35$, то $\alpha_1 = 0,02857$; $\alpha_2 = 0,05714$; $p_0 = 0,91829$; $p_1 = 0,02624$; $p_2 = 0,05247$; $p_3 = p_4 = 0,00150$; $p_{кр} = 0,0030$.

Случай второй. Если на пожаре организованы три боевых участка, то в сети связи могут находиться РТП и начальники боевых участков — НБУ₁,

Таблица 2. Состояния сети связи в соответствии с графом переходов на рис. 2

Table 2. The status of the network connection in accordance with the transition graph in Fig. 2

$\{S\}$	Состояние / Status	Примечание / Note
S_0	Сеть свободна / Network is free	
S_1	НБУ ₁ ↔ РТП / The chief of site 1 with the officer in charge of fire extinguishing	
S_2	НБУ ₂ ↔ РТП / The chief of site 2 with the officer in charge of fire extinguishing	
S_3	НБУ ₃ ↔ РТП / The chief of site 3 with the officer in charge of fire extinguishing	
S_4	НБУ ₁ ↔ РТП, НБУ ₂ → РТП / The chief of site 1 with the officer in charge of fire extinguishing, the chief of site 2 with the officer in charge of fire extinguishing	S_4 – S_9 Задержка в управлении Control delay
S_5	НБУ ₁ ↔ РТП, НБУ ₃ → РТП / The chief of site 1 with the officer in charge of fire extinguishing, the chief of site 3 with the officer in charge of fire extinguishing	
S_6	НБУ ₂ ↔ РТП, НБУ ₁ → РТП / The chief of site 2 with the officer in charge of fire extinguishing, the chief of site 1 with the officer in charge of fire extinguishing	
S_7	НБУ ₂ ↔ РТП, НБУ ₃ → РТП / The chief of site 2 with the officer in charge of fire extinguishing, the chief of site 3 with the officer in charge of fire extinguishing	
S_8	НБУ ₃ ↔ РТП, НБУ ₁ → РТП / The chief of site 3 with the officer in charge of fire extinguishing, the chief of site 1 with the officer in charge of fire extinguishing	
S_9	НБУ ₃ ↔ РТП, НБУ ₂ → РТП / The chief of site 3 with the officer in charge of fire extinguishing, the chief of site 2 with the officer in charge of fire extinguishing	S_{10} – S_{12} Критический случай Critical case
S_{10}	НБУ ₁ ↔ РТП, НБУ ₂ → РТП, НБУ ₃ → РТП / The chief of site 1 with the officer in charge of fire extinguishing, the chief of site 2 with the officer in charge of fire extinguishing, the chief of site 3 with the officer in charge of fire extinguishing	
S_{11}	НБУ ₂ ↔ РТП, НБУ ₁ → РТП, НБУ ₃ → РТП / The chief of site 2 with the officer in charge of fire extinguishing, the chief of site 1 with the officer in charge of fire extinguishing, the chief of site 3 with the officer in charge of fire extinguishing	
S_{12}	НБУ ₃ ↔ РТП, НБУ ₁ → РТП, НБУ ₂ → РТП / The chief of site 3 with the officer in charge of fire extinguishing, the chief of site 1 with the officer in charge of fire extinguishing, the chief of site 2 with the officer in charge of fire extinguishing	

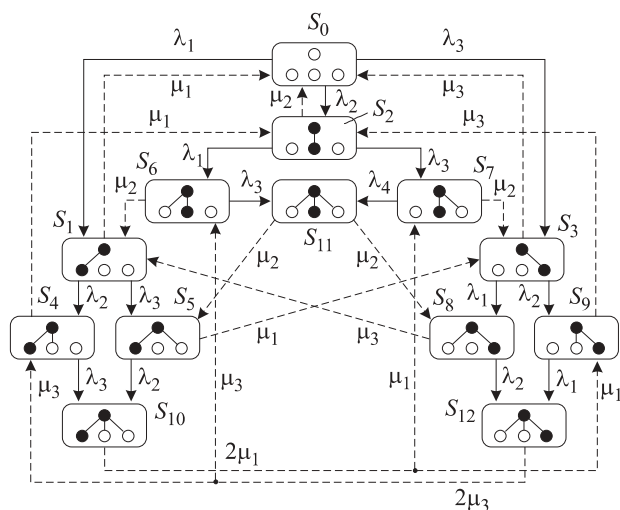


Рис. 2. Граф переходов для сети связи РТП (верхний кружок) с НБУ₁ (левый нижний кружок), НБУ₂ (средний нижний кружок) и НБУ₃ (правый нижний кружок)

Fig. 2. The transition graph for the communication network: the officer in charge of fire extinguishing (upper circle) contacts the chief of site 1 (lower left circle), the chief of site 2 (lower middle circle) and the chief of site 3 (lower right circle)

НБУ₂ и НБУ₃. Такая сеть может иметь 13 состояний S_0-S_{12} (табл. 2) с вероятностями соответственно p_0-p_{12} . Граф переходов представлен на рис. 2.

Система уравнений для стационарного случая в соответствии с графом на рис. 2 будет иметь вид:

$$\begin{aligned}
 0 &= -(\lambda_1 + \lambda_2 + \lambda_3)p_0 + \mu_1 p_1 + \mu_2 p_2 + \mu_3 p_3; \\
 0 &= \lambda_1 p_0 - (\lambda_2 + \lambda_3 + \mu_1)p_1 + \mu_2 p_6 + \mu_3 p_8; \\
 0 &= \lambda_2 p_0 - (\lambda_1 + \lambda_3 + \mu_2)p_2 + \mu_1 p_4 + \mu_3 p_9; \\
 0 &= \lambda_3 p_0 - (\lambda_1 + \lambda_2 + \mu_3)p_3 + \mu_1 p_5 + \mu_2 p_7; \\
 0 &= \lambda_2 p_1 - (\lambda_3 + \mu_1)p_4 + \mu_3 p_{12}; \\
 0 &= \lambda_3 p_1 - (\lambda_2 + \mu_1)p_5 + \mu_2 p_{11}; \\
 0 &= \lambda_1 p_2 - (\lambda_3 + \mu_2)p_6 + \mu_3 p_{12}; \\
 0 &= \lambda_3 p_2 - (\lambda_1 + \mu_2)p_7 + \mu_1 p_{10}; \\
 0 &= \lambda_1 p_3 - (\lambda_2 + \mu_3)p_8 + \mu_2 p_{11}; \\
 0 &= \lambda_2 p_3 - (\lambda_1 + \mu_3)p_9 + \mu_1 p_{10}; \\
 0 &= \lambda_3 p_4 + \lambda_2 p_5 - 2\mu_1 p_{10}; \\
 0 &= \lambda_3 p_6 + \lambda_1 p_7 - 2\mu_2 p_{11}; \\
 0 &= \lambda_2 p_8 + \lambda_1 p_9 - 2\mu_3 p_{12}; \\
 \sum_{i=0}^{12} p_i &= 1,
 \end{aligned} \tag{7}$$

где $\lambda_1, \lambda_2, \lambda_3$ — интенсивности необходимости переговоров между РТП и НБУ₁/НБУ₂/НБУ₃ соответственно;

μ_1, μ_2, μ_3 — параметры, обратно пропорциональные среднему времени переговоров между РТП и НБУ₁/НБУ₂/НБУ₃ соответственно.

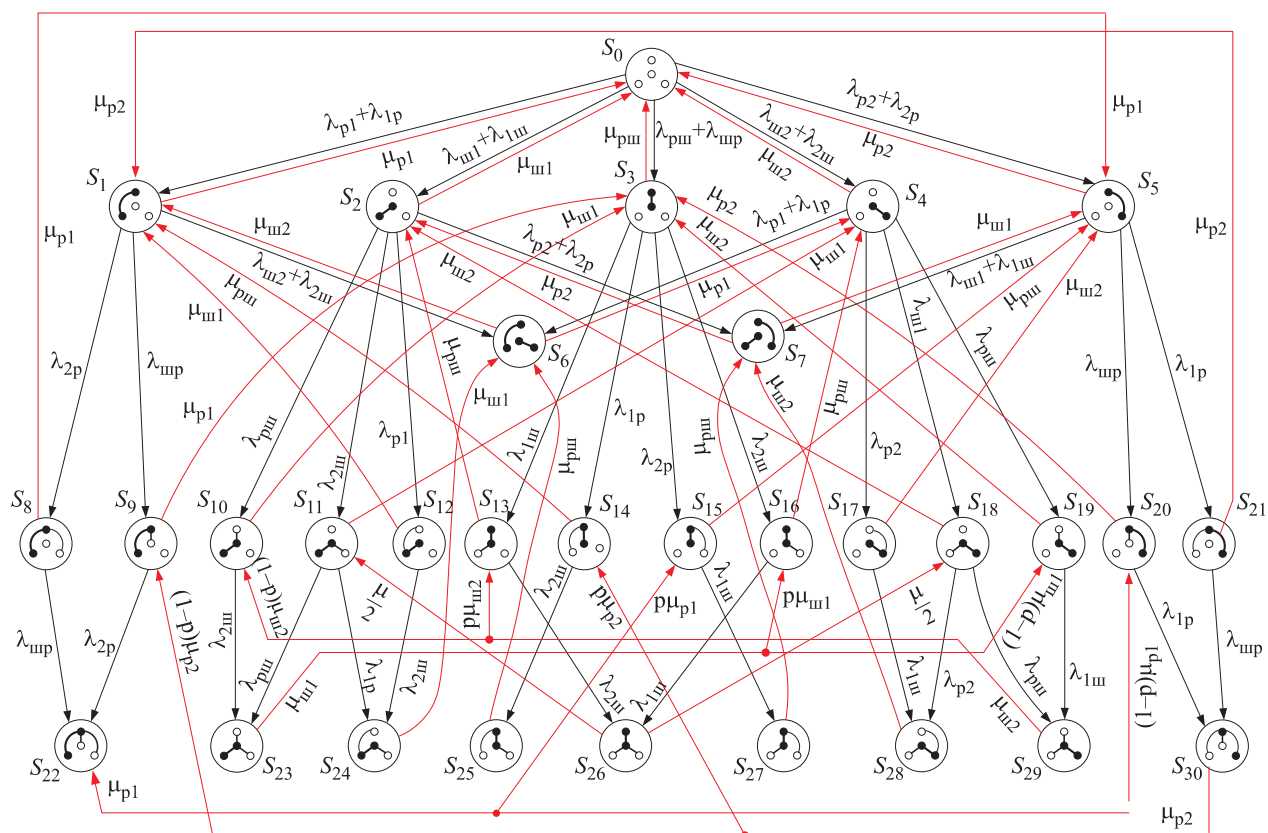


Рис. 3. Граф переходов для сети связи РТП (верхний кружок), НШ (средний кружок), НБУ₁ (левый нижний кружок) и НБУ₂ (правый нижний кружок)

Fig. 3. The transition graph for the communication network: the officer in charge of fire extinguishing (upper circle) contacts the chief of headquarter (middle circle), the chief of site 1 (lower left circle), the chief of site 2 (lower right circle)

Таблица 3. Состояния сети связи в соответствии с графом переходов на рис. 3

Table 3. The status of the network connection in accordance with the transition graph in Fig. 3

$\{S\}$	Состояние / Status	Примечание / Note
S_0	Сеть свободна / Network is free	
S_1	НБУ ₁ ↔ РТП / The chief of site 1 with the officer in charge of fire extinguishing	
S_2	НБУ ₁ ↔ НШ / The chief of site 1 with the chief of headquarter	
S_3	НШ ↔ РТП / The chief of headquarter with the officer in charge of fire extinguishing	
S_4	НБУ ₂ ↔ НШ / The chief of site 2 with the chief of headquarter	
S_5	НБУ ₂ ↔ РТП / The chief of site 2 with the officer in charge of fire extinguishing	
S_6	НБУ ₁ ↔ РТП, НШ ↔ НБУ ₂ / The chief of site 1 with the officer in charge of fire extinguishing, the chief of headquarter with the chief of site 2	
S_7	НБУ ₂ ↔ РТП, НШ ↔ НБУ ₁ / The chief of site 2 with the officer in charge of fire extinguishing, the chief of headquarter with the chief of site 1	
S_8	НБУ ₁ ↔ РТП, НБУ ₂ → РТП / The chief of site 1 with the officer in charge of fire extinguishing, the chief of site 2 with the officer in charge of fire extinguishing	S_8-S_{21} Задержка в управлении Control delay
S_9	НБУ ₁ ↔ РТП, НШ → РТП / The chief of site 1 with the officer in charge of fire extinguishing, the chief of headquarter with the officer in charge of fire extinguishing	
S_{10}	НБУ ₁ ↔ НШ, РТП → НШ / The chief of site 1 with the chief of headquarter, the officer in charge of fire extinguishing with the chief of headquarter	
S_{11}	НБУ ₁ ↔ НШ, НБУ ₂ → НШ / The chief of site 1 with the chief of headquarter, the chief of site 2 with the chief of headquarter	
S_{12}	НБУ ₁ ↔ НШ, РТП → НБУ ₁ / The chief of site 1 with the chief of headquarter, the officer in charge of fire extinguishing with the chief of site 1	
S_{13}	НШ ↔ РТП, НБУ ₁ → НШ / The chief of headquarter with the officer in charge of fire extinguishing, the chief of site 1 with the chief of headquarter	
S_{14}	НШ ↔ РТП, НБУ ₁ → РТП / The chief of headquarter with the officer in charge of fire extinguishing, the chief of site 1 with the officer in charge of fire extinguishing	
S_{15}	НШ ↔ РТП, НБУ ₂ → РТП / The chief of headquarter with the officer in charge of fire extinguishing, the chief of site 2 with the officer in charge of fire extinguishing	
S_{16}	НШ ↔ РТП, НБУ ₂ → НШ / The chief of headquarter with the officer in charge of fire extinguishing, the chief of site 2 with the chief of headquarter	
S_{17}	НБУ ₂ ↔ НШ, РТП → НБУ ₂ / The chief of site 2 with the chief of headquarter, the officer in charge of fire extinguishing with the chief of site 2	
S_{18}	НБУ ₂ ↔ НШ, НБУ ₁ → НШ / The chief of site 2 with the chief of headquarter, the chief of site 1 with the chief of headquarter	
S_{19}	НБУ ₂ ↔ НШ, РТП → НШ / The chief of site 2 with the chief of headquarter, the officer in charge of fire extinguishing with the chief of headquarter	
S_{20}	НБУ ₂ ↔ РТП, НШ → РТП / The chief of site 2 with the officer in charge of fire extinguishing, the chief of headquarter with the officer in charge of fire extinguishing	
S_{21}	НБУ ₂ ↔ РТП, НБУ ₁ → РТП / The chief of site 2 with the officer in charge of fire extinguishing, the chief of site 1 with the officer in charge of fire extinguishing	
S_{22}	НБУ ₁ ↔ РТП, НШ → РТП, НБУ ₂ → РТП / The chief of site 1 with the officer in charge of fire extinguishing, the chief of headquarter with the officer in charge of fire extinguishing, the chief of site 2 with the officer in charge of fire extinguishing	$S_{22}-S_{30}$ Критический случай Critical case
S_{23}	НБУ ₁ ↔ НШ, РТП → НШ, НБУ ₂ → НШ / The chief of site 1 with the chief of headquarter, the officer in charge of fire extinguishing with the chief of headquarter, the chief of site 2 with the chief of headquarter	
S_{24}	НБУ ₁ ↔ НШ, РТП → НБУ ₁ , НБУ ₂ → НШ / The chief of site 1 with the chief of headquarter, the officer in charge of fire extinguishing with the chief of site 1, the chief of site 2 with the chief of headquarter	
S_{25}	НШ ↔ РТП, НБУ ₁ → РТП, НБУ ₂ → НШ / The chief of headquarter with the officer in charge of fire extinguishing, the chief of site 1 with the officer in charge of fire extinguishing, the chief of site 2 with the chief of headquarter	
S_{26}	НШ ↔ РТП, НБУ ₁ → НШ, НБУ ₂ → НШ / The chief of headquarter with the officer in charge of fire extinguishing, the chief of site 1 with the chief of headquarter, the chief of site 2 with the chief of headquarter	

{S}	Состояние / Status	Примечание / Note
S_{27}	НШ ↔ РТП, НБУ ₁ → НШ, НБУ ₂ → РТП / The chief of headquarter with the officer in charge of fire extinguishing, the chief of site 1 with the chief of headquarter, the chief of site 2 with the officer in charge of fire extinguishing	$S_{22}-S_{30}$ Критический случай Critical case
S_{28}	НБУ ₂ ↔ НШ, НБУ ₁ → НШ, РТП → НБУ ₂ / The chief of site 2 with the chief of headquarter, the chief of site 1 with the chief of headquarter, the officer in charge of fire extinguishing with the chief of site 2	
S_{29}	НБУ ₂ ↔ НШ, НБУ ₁ → НШ, РТП → НШ / The chief of site 2 with the chief of headquarter, the chief of site 1 with the chief of headquarter, the officer in charge of fire extinguishing with the chief of headquarter	
S_{30}	НБУ ₂ ↔ РТП, НБУ ₁ → РТП, НШ → РТП / The chief of site 2 with the officer in charge of fire extinguishing, the chief of site 1 with the officer in charge of fire extinguishing, the chief of headquarter with the officer in charge of fire extinguishing	

Очевидно, состояния S_4-S_9 соответствуют тому, что хотя бы один из НБУ не может связаться с РТП, а это может представлять некоторую проблему при управлении тушением пожара. Состояния $S_{10}-S_{12}$ являются критическими, так как сразу два НБУ не могут связаться с РТП. Вероятность возникновения такой ситуации

$$p_{кр} = p_{10} + p_{11} + p_{12}. \quad (8)$$

Как и в предыдущем случае, существует частное решение системы уравнений (4) при $\mu_1 = \mu_2 = \mu_3 = \mu$:

$$\begin{aligned} p_0 &= [1 + \alpha_1 + \alpha_2 + \alpha_3 + \\ &\quad + 2(\alpha_1\alpha_2 + \alpha_1\alpha_3 + \alpha_2\alpha_3) + 6\alpha_1\alpha_2\alpha_3]^{-1}; \\ p_1 &= \alpha_1 p_0; \\ p_2 &= \alpha_2 p_0; \\ p_3 &= \alpha_3 p_0; \\ p_4 &= p_6 = \alpha_1 \alpha_2 p_0; \\ p_5 &= p_8 = \alpha_1 \alpha_3 p_0; \\ p_7 &= p_9 = \alpha_2 \alpha_3 p_0; \\ p_{10} &= p_{11} = p_{12} = 2\alpha_1 \alpha_2 \alpha_3 p_0, \end{aligned} \quad (9)$$

где $\alpha_1, \alpha_2, \alpha_3$ — приведенные нагрузки; $\alpha_1 = \lambda_1/\mu$; $\alpha_2 = \lambda_2/\mu$; $\alpha_3 = \lambda_3/\mu$.

Случай третий. Если в сети связи находятся РТП, НШ, НБУ₁ и НБУ₂, то такая сеть может иметь 31 состояние — S_0-S_{30} (табл. 3). Граф переходов представлен на рис. 3.

Система уравнений, связывающая вероятности состояний сети и интенсивности переходов, для стационарного случая в соответствии с графом на рис. 3 имеет вид:

$$\begin{aligned} 0 &= -(\lambda_{p1} + \lambda_{1p} + \lambda_{ш1} + \lambda_{1ш} + \lambda_{рш} + \lambda_{шр} + \lambda_{ш2} + \lambda_{2ш} + \\ &\quad + \lambda_{p2} + \lambda_{2p})p_0 + \mu_{p1}p_1 + \mu_{ш1}p_2 + \mu_{рш}p_3 + \mu_{ш2}p_4 + \mu_{p2}p_5; \\ 0 &= (\lambda_{p1} + \lambda_{1p})p_0 - (\lambda_{2p} + \lambda_{шр} + \mu_{p1} + \lambda_{ш2} + \lambda_{2ш})p_1 + \\ &\quad + \mu_{ш2}p_6 + \mu_{ш1}p_{12} + \mu_{рш}p_{14} + \mu_{p2}p_{21}; \\ 0 &= (\lambda_{ш1} + \lambda_{1ш})p_0 - (\lambda_{p1} + \lambda_{рш} + \lambda_{2ш} + \lambda_{p2} + \\ &\quad + \lambda_{2p} + \mu_{ш1})p_2 + \mu_{p2}p_7 + \mu_{рш}p_{13} + \mu_{ш2}p_{18}; \\ 0 &= (\lambda_{рш} + \lambda_{шр})p_0 - (\lambda_{1p} + \lambda_{1ш} + \lambda_{2p} + \lambda_{2ш} + \mu_{рш})p_3 + \\ &\quad + \mu_{p1}p_9 + \mu_{ш1}p_{10} + \mu_{ш2}p_{19} + \mu_{p2}p_{20}; \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} 0 &= (\lambda_{ш2} + \lambda_{2ш})p_0 - (\lambda_{1p} + \lambda_{p1} + \lambda_{ш1} + \lambda_{p2} + \lambda_{рш} + \\ &\quad + \mu_{ш2})p_4 + \mu_{p1}p_6 + \mu_{ш1}p_{11} + \mu_{рш}p_{16}; \\ 0 &= (\lambda_{p2} + \lambda_{2p})p_0 - (\lambda_{1p} + \lambda_{шр} + \mu_{p2} + \lambda_{ш1} + \lambda_{1ш})p_5 + \\ &\quad + \mu_{ш1}p_7 + \mu_{p1}p_8 + \mu_{рш}p_{15} + \mu_{ш2}p_{17}; \\ 0 &= (\lambda_{2ш} + \lambda_{ш2})p_1 + (\lambda_{1p} + \lambda_{p1})p_4 - (\mu_{ш2} + \mu_{p1})p_6 + \\ &\quad + \mu_{ш1}p_{24} + \mu_{рш}p_{25}; \\ 0 &= (\lambda_{p2} + \lambda_{2p})p_2 + (\lambda_{1ш} + \lambda_{ш1})p_5 - (\mu_{ш1} + \mu_{p2})p_7 + \\ &\quad + \mu_{рш}p_{27} + \mu_{ш2}p_{28}; \\ 0 &= \lambda_{2p}p_1 - (\lambda_{шр} + \mu_{p1})p_8; \\ 0 &= \lambda_{шр}p_1 - (\lambda_{2p} + \mu_{p1})p_9 + (1-p)\mu_{p2}p_{30}; \\ 0 &= \lambda_{рш}p_2 - (\lambda_{2ш} + \mu_{ш1})p_{10} + (1-p)\mu_{ш2}p_{29}; \\ 0 &= \lambda_{2ш}p_2 - (\lambda_{p1} + \lambda_{рш} + \mu_{ш1})p_{11} + 0,5\mu_{рш}p_{26}; \\ 0 &= \lambda_{p1}p_2 - (\lambda_{2ш} + \mu_{ш1})p_{12}; \\ 0 &= \lambda_{1ш}p_3 - (\lambda_{2ш} + \mu_{рш})p_{13} + p\mu_{ш2}p_{29}; \\ 0 &= \lambda_{1p}p_3 - (\lambda_{2ш} + \mu_{рш})p_{14} + p\mu_{p2}p_{30}; \\ 0 &= \lambda_{2p}p_3 - (\lambda_{1ш} + \mu_{рш})p_{15} + p\mu_{p1}p_{22}; \\ 0 &= \lambda_{2ш}p_3 - (\lambda_{1ш} + \mu_{рш})p_{16} + p\mu_{ш1}p_{23}; \\ 0 &= \lambda_{p2}p_4 - (\lambda_{1ш} + \mu_{ш2})p_{17}; \\ 0 &= \lambda_{1ш}p_4 - (\lambda_{p2} + \lambda_{рш} + \mu_{ш2})p_{18} + 0,5\mu_{рш}p_{26}; \\ 0 &= \lambda_{рш}p_4 - (\lambda_{1ш} + \mu_{ш2})p_{19} + (1-p)\mu_{ш1}p_{23}; \\ 0 &= \lambda_{шр}p_5 - (\lambda_{1p} + \mu_{p2})p_{20} + (1-p)\mu_{p1}p_{22}; \\ 0 &= \lambda_{1p}p_5 - (\lambda_{шр} + \mu_{p2})p_{21}; \\ 0 &= \lambda_{шр}p_8 + \lambda_{2p}p_9 - \mu_{p1}p_{22}; \\ 0 &= \lambda_{2ш}p_{10} + \lambda_{рш}p_{11} - \mu_{ш1}p_{23}; \\ 0 &= \lambda_{pp1}p_{11} + \lambda_{2ш}p_{12} - \mu_{ш1}p_{24}; \\ 0 &= \lambda_{2ш}p_{14} - \mu_{рш}p_{25}; \\ 0 &= \lambda_{2ш}p_{13} + \lambda_{1ш}p_{16} - \mu_{рш}p_{26}; \\ 0 &= \lambda_{1ш}p_{15} - \mu_{рш}p_{27}; \\ 0 &= \lambda_{1ш}p_{17} + \lambda_{p2}p_{18} - \mu_{ш2}p_{28}; \\ 0 &= \lambda_{рш}p_{18} + \lambda_{1ш}p_{19} - \mu_{ш2}p_{29}; \\ 0 &= \lambda_{1p}p_{20} + \lambda_{шр}p_{21} - \mu_{p2}p_{30}; \\ \sum_{i=0}^{30} p_i &= 1, \end{aligned} \quad (10)$$

где $\{\lambda\}, \{\mu\}$ — параметры переговоров, приведенные в табл. 4.

Таблица 4. Интенсивности необходимости связи и переговоров между должностными лицами на пожаре

Table 4. The intensity of the need for communication and negotiations between the officials at a fire units operating management

$\{\lambda\}$	Интенсивность необходимости связи The intensity of the need for communication	$\{\mu\}$	Параметр, обратный времени переговоров между Option backwards the time of the negotiations between
$\lambda_{pш}$	РТП с НШ по инициативе РТП / Communication of the officer in charge of fire extinguishing with the chief of headquarter at the initiative of the officer in charge of fire extinguishing	$\mu_{pш}$	РТП и НШ / The officer in charge of fire extinguishing and the chief of headquarter
$\lambda_{шp}$	РТП с НШ по инициативе НШ / Communication of the officer in charge of fire extinguishing with the chief of headquarter at the initiative of the chief of headquarter	μ_{p1}	РТП и НБУ ₁ / The officer in charge of fire extinguishing and the chief of site 1
λ_{p1}	РТП с НБУ ₁ по инициативе РТП / Communication of the officer in charge of fire extinguishing with the chief of site 1 at the initiative of the officer in charge of fire extinguishing	μ_{p2}	РТП и НБУ ₂ / The officer in charge of fire extinguishing and the chief of site 2
λ_{1p}	РТП с НБУ ₁ по инициативе НБУ ₁ / Communication of the officer in charge of fire extinguishing with the chief of site 1 at the initiative of the chief of site 1	$\mu_{ш1}$	НШ и НБУ ₁ / The chief of headquarter and the chief of site 1
λ_{p2}	РТП с НБУ ₂ по инициативе РТП / Communication of the officer in charge of fire extinguishing with the chief of site 2 at the initiative of the officer in charge of fire extinguishing	$\mu_{ш2}$	НШ и НБУ ₂ / The chief of headquarter and the chief of site 2
λ_{2p}	РТП с НБУ ₂ по инициативе НБУ ₂ / Communication of the officer in charge of fire extinguishing with the chief of site 2 at the initiative of the chief of site 2	p	Вероятность приоритета связи РТП / The probability of communication priority of the head of the officer in charge of fire extinguishing
$\lambda_{ш1}$	НШ с НБУ ₁ по инициативе НШ / Communication of the chief of headquarter with the chief of site 1 at the initiative of the chief of headquarter		
$\lambda_{1ш}$	НШ с НБУ ₁ по инициативе НБУ ₁ / Communication of the chief of headquarter with the chief of site 1 at the initiative of the chief of site 1		
$\lambda_{ш2}$	НШ с НБУ ₂ по инициативе НШ / Communication of the chief of headquarter with the chief of site 2 at the initiative of the chief of headquarter		
$\lambda_{2ш}$	НШ с НБУ ₂ по инициативе НБУ ₂ / Communication of the chief of headquarter with the chief of site 2 at the initiative of the chief of site 2		

Решение системы линейных алгебраических уравнений (7) возможно только численными методами. Как следует из табл. 3 и графа на рис. 3, критичными для устойчивости управления на таком пожаре будут состояния S_{22} – S_{30} , вероятность чего

$$P_{кр} = \sum_{i=22}^{30} p_i. \quad (11)$$

Выводы

Таким образом, в работе показана возможность моделирования важнейшего элемента управления действиями пожарных подразделений — сети связи на пожаре с использованием теории массового обслуживания. В качестве примеров рассмотрены несколько вариантов сетей связи, в которых руководи-

тель тушения пожара взаимодействует с начальниками боевых участков и начальником штаба. Разработанные для рассматриваемых случаев математические модели позволяют определить вероятностные характеристики функционирования сети связи и оценить возможность появления критических режимов управления, когда у абонентов сети возникает экстренная необходимость связаться с другими участниками, которые, в свою очередь, уже ведут переговоры с абонентами сети.

В дальнейшем представляется целесообразным рассмотреть и другие варианты организации связи на пожаре, получить численные значения вероятностей состояний сети и сформулировать предложения по обеспечению устойчивости связи, в том числе с учетом надежности технических средств.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Тербнев В. В., Семенов А. О., Тараканов Д. В. Теоретические основы принятия решений при управлении силами и средствами на пожаре // Пожаровзрывобезопасность/Fire and Explosion Safety. — 2012. — Т. 21, № 10. — С. 14–17.

2. Тараканов Д. В., Баканов М. О., Колбашов М. А., Моисеев Ю. Н. Автоматизированная информационная система связи и управления пожарно-спасательными подразделениями // Пожаровзрывобезопасность/Fire and Explosion Safety. — 2018. — Т. 27, № 2-3. — С. 20–26. DOI: 10.18322/PVB.2018.27.02-03.20-26.
3. Баканов М. О., Тараканов Д. В., Анкудинов М. В. Модель мониторинга для оперативного управления при ликвидации пожаров и чрезвычайных ситуаций // Мониторинг. Наука и технологии. — 2017. — № 3(32). — С. 77–80. URL: <http://www.csmos.ru/index.php?page=mnt-issue-2017-3-11> (дата обращения: 01.03.2019).
4. Топольский Н. Г., Тараканов Д. В., Баканов М. О. Многокритериальная модель мониторинга пожара в здании для управления пожарно-спасательными подразделениями // Пожаровзрывобезопасность/Fire and Explosion Safety. — 2018. — Т. 27, № 5. — С. 26–33. DOI: 10.18322/PVB.2018.27.05.26-33.
5. Денисов А. Н. Методы, модели и алгоритмы поддержки управления пожарно-спасательными подразделениями при тушении пожаров : дис. ... д-ра техн. наук. — М., 2018. — 406 с.
6. Пелех М. Т. Модели и методы оценивания и совершенствования деятельности государственной противопожарной службы (на примере Республики Коми) : дис. ... канд. техн. наук. — СПб., 2009. — 143 с.
7. Денисов А. Н., Степанов О. И. Алгоритм синтеза системы управления пожарными подразделениями на месте пожара // Техносферная безопасность. — 2018. — Т. 19, № 2. — С. 51–59.
8. Таранцев А. А., Холостов А. Л., Ищенко А. Д., Потапенко В. В. О задачах анализа и синтеза систем обслуживания заявок нескольких типов // Пожаровзрывобезопасность/Fire and Explosion Safety. — 2017. — Т. 26, № 3. — С. 31–38. DOI: 10.18322/PVB.2017.26.03.31-38.
9. Wex F., Schryen G., Feuerriegel S., Neumann D. Emergency response in natural disaster management: Allocation and scheduling of rescue units // European Journal of Operational Research. — 2014. — Vol. 235, No. 3. — P. 697–708. DOI: 10.1016/j.ejor.2013.10.029.
10. Griffith J. D., Kochenderfer M. J., Moss R. J., Mišić V. V., Gupta V., Bertsimas D. Automated dynamic resource allocation for wildfire suppression // Lincoln Laboratory Journal. — 2017. — Vol. 22, No. 2. — P. 38–59. URL: https://www.ll.mit.edu/sites/default/files/page/doc/2018-06/22_2_3_Griffith.pdf (дата обращения: 05.03.2019).
11. Thompson M. P., Rodriguez y Silva F., Calkin D. E., Hand M. S. A review of challenges to determining and demonstrating efficiency of large fire management // International Journal of Wildland Fire. — 2017. — Vol. 26, No. 7. — P. 562–573. DOI: 10.1071/wf16137.
12. Pasnak I., Prydatko O., Gavriluk A. Development of algorithms for efficient management of fire rescue units // Eastern-European Journal of Enterprise Technologies. — 2016. — Vol. 81, No. 3(81). — P. 22–28. DOI: 10.15587/1729-4061.2016.71604.
13. Sakellariou S., Tampekis S., Samara F., Sfougaris A., Christopoulou O. Review of state-of-the-art decision support systems (DSSs) for prevention and suppression of forest fires // Journal of Forestry Research. — 2017. — Vol. 28, No. 6. — P. 1107–1117. DOI: 10.1007/s11676-017-0452-1.
14. Katuwal H., Dunn C. J., Calkin D. E. Characterising resource use and potential inefficiencies during large-fire suppression in the western US // International Journal of Wildland Fire. — 2017. — Vol. 26, No. 7. — P. 604–614. DOI: 10.1071/wf17054.
15. O'Connor C. D., Calkin D. E., Thompson M. P. An empirical machine learning method for predicting potential fire control locations for pre-fire planning and operational fire management // International Journal of Wildland Fire. — 2017. — Vol. 26, No. 7. — P. 587–597. DOI: 10.1071/wf16135.
16. Martell D. L. A review of recent forest and wildland fire management decision support systems research // Current Forestry Reports. — 2015. — Vol. 1, No. 2. — P. 128–137. DOI: 10.1007/s40725-015-0011-y.
17. Fahy R. F., LeBlanc P. R., Molis J. Firefighter Fatalities in the United States — NFPA-2017. URL: <https://www.nfpa.org/-/media/Files/News-and-Research/Fire-statistics-and-reports/Emergency-responders/osFFF.pdf> (дата обращения: 05.03.2019).
18. Маркова Т. С., Таранцев А. А. Моделирование схемы взаимодействия сил и средств при ликвидации пожара в зоологическом парке // Вестник Санкт-Петербургского университета Государственной противопожарной службы МЧС России. — 2016. — № 1. — С. 85–92. URL: <https://vestnik.igps.ru/wp-content/uploads/V81/14.pdf> (дата обращения: 01.03.2019).
19. Зыков В. И. Методологические основы моделирования и построения сетей оперативной связи в системе управления пожарной охраной : дис. ... д-ра техн. наук. — М., 2001. — 321 с.
20. Вентцель Е. С. Исследование операций. — М. : Советское радио, 1972. — 552 с.

REFERENCES

1. V. V. Terebnev, A. O. Semenov, D. V. Tarakanov. Decision making theoretical basis of management of fire. *Pozharovzryvobezopasnost/Fire and Explosion Safety*, 2012, vol. 21, no 10, pp. 14–17 (in Russian).
2. D. V. Tarakanov, M. O. Bakanov, M. A. Kolbashov, Yu. N. Moiseev. Fire and rescue team communication and control automated information system. *Pozharovzryvobezopasnost/Fire and Explosion Safety*, 2018, vol. 27, no. 2-3, pp. 20–26 (in Russian). DOI: 10.18322/PVB.2018.27.02-03.20-26.
3. M. O. Bakanov, D. V. Tarakanov, V. M. Ankudinov. The model of monitoring for operational management at the liquidation of emergency situations. *Monitoring. Science and Technologies*, 2017, no. 3(32), pp. 77–80 (in Russian). Available at: <http://www.csmos.ru/index.php?page=mnt-issue-2017-3-11> (Accessed 1 March 2019).
4. N. G. Topolskiy, D. V. Tarakanov, M. O. Bakanov. Multi-criteria model for monitoring of fire in the building for managing fire-rescue subdivisions. *Pozharovzryvobezopasnost/Fire and Explosion Safety*, 2018, vol. 27, no. 5, pp. 26–33 (in Russian). DOI: 10.18322/PVB.2018.27.05.26-33.
5. A. N. Denisov. *Methods, models and algorithms to support the management of fire and rescue units in fire fighting*. Dr. Sci. Diss. (Eng.). Moscow, 2018. 406 p. (in Russian).
6. M. T. Pelekh. *Models and methods of evaluation and improvement of the state fire service (on the example of the Republic of Komi)*. Cand. Sci. Diss. (Eng.). Saint Petersburg, 2009. 143 p. (in Russian).
7. A. N. Denisov, O. I. Stepanov. The algorithm of synthesis of management system of fire and rescue divisions on the fire place. *Tekhnosfernaya bezopasnost / Technosphere Safety*, 2018, vol. 19, no 2, pp. 51–59 (in Russian).
8. A. A. Tarantsev, A. L. Kholostov, A. D. Ishchenko, V. V. Potapenko. Problems of analysis and synthesis of application service systems of several types. *Pozharovzryvobezopasnost/Fire and Explosion Safety*, 2017, vol. 26, no. 3, pp. 31–38 (in Russian). DOI: 10.18322/PVB.2017.26.03.31-38.
9. F. Wex, G. Schryen, S. Feuerriegel, D. Neumann. Emergency response in natural disaster management: Allocation and scheduling of rescue units. *European Journal of Operational Research*, 2014, vol. 235, no. 3, pp. 697–708. DOI: 10.1016/j.ejor.2013.10.029.
10. J. D. Griffith, M. J. Kochenderfer, R. J. Moss, V. V. Mišić, V. Gupta, D. Bertsimas. Automated dynamic resource allocation for wildfire suppression. *Lincoln Laboratory Journal*, 2017, vol. 22, no 2, pp. 38–59. Available at: https://www.ll.mit.edu/sites/default/files/page/doc/2018-06/22_2_3_Griffith.pdf (Accessed 5 March 2019).
11. M. P. Thompson, F. Rodríguez y Silva, D. E. Calkin, M. S. Hand. A review of challenges to determining and demonstrating efficiency of large fire management. *International Journal of Wildland Fire*, 2017, vol. 26, no 7, pp. 562–573. DOI: 10.1071/wf16137.
12. I. Pasnak, O. Prydatko, A. Gavrilyk. Development of algorithms for efficient management of fire rescue units. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*, 2016, vol. 81, no 3(81), pp. 22–28. DOI: 10.15587/1729-4061.2016.71604.
13. S. Sakellariou, S. Tampekis, F. Samara, A. Sfougaris, O. Christopoulou. Review of state-of-the-art decision support systems (DSSs) for prevention and suppression of forest fires. *Journal of Forestry Research*, 2017, vol. 28, no. 6, pp. 1107–1117. DOI: 10.1007/s11676-017-0452-1.
14. H. Katuwal, C. J. Dunn, D. E. Calkin. Characterising resource use and potential inefficiencies during large-fire suppression in the western US. *International Journal of Wildland Fire*, 2017, vol. 26, no. 7, pp. 604–614. DOI: 10.1071/wf17054.
15. C. D. O'Connor, D. E. Calkin, M. P. Thompson. An empirical machine learning method for predicting potential fire control locations for pre-fire planning and operational fire management. *International Journal of Wildland Fire*, 2017, vol. 26, no 7, pp. 587–597. DOI: 10.1071/wf16135.
16. D. L. Martell. A review of recent forest and wildland fire management decision support systems research. *Current Forestry Reports*, 2015, vol. 1, no. 2, pp. 128–137. DOI: 10.1007/s40725-015-0011-y.
17. R. F. Fahy, P. R. LeBlanc, J. Molis. *Firefighter Fatalities in the United States — NFPA-2017*. Available at: <https://www.nfpa.org/-/media/Files/News-and-Research/Fire-statistics-and-reports/Emergency-responders/osFFF.pdf> (Accessed 5 March 2019).
18. T. S. Markova, A. A. Tarantsev. Circuit simulation of the interaction of forces and means at liquidation of a fire in a zoological park. *Vestnik Sankt-Peterburgskogo universiteta Gosudarstvennoy protivopozharnoy sluzhby MChS Rossii / Herald of St. Petersburg University of State Fire Service of Emercom of Russia. Scientific and Analytical Magazine*, 2016, no. 1, pp. 85–92 (in Russian). Available at: <https://vestnik.igps.ru/wp-content/uploads/V81/14.pdf> (Accessed 1 March 2019).

19. V. I. Zykov. *Methodological basis of modeling and construction of operational communication networks in the fire protection management system*. Dr. Sci. Diss. (Eng.). Moscow, 2001. 321 p. (in Russian).
20. E. S. Ventsel. *Issledovaniye operatsiy* [Operations research]. Moscow, Sovetskoye radio Publ., 1972. 552 p. (in Russian).

Поступила 09.03.2019; после доработки 19.04.2019; принята к публикации 23.04.2019
Received 9 March 2019; received in revised form 19 April 2019; accepted 23 April 2019

Информация об авторах

АЛЕШКОВ Михаил Владимирович, д-р техн. наук, профессор, заместитель начальника по научной работе, Академия ГПС МЧС России, г. Москва, Российская Федерация; ORCID: 0000-0001-7844-1955

БАСОВ Вадим Анатольевич, первый заместитель начальника, Академия ГПС МЧС России, г. Москва, Российская Федерация; ORCID: 0000-0003-2779-5723

КОЛБАСИН Андрей Александрович, канд. техн. наук, старший научный сотрудник, научно-исследовательский отдел Учебно-научного комплекса пожарной и аварийно-спасательной техники, Академия ГПС МЧС России, г. Москва, Российская Федерация; ORCID: 0000-0003-0140-7569

ТАРАНЦЕВ Александр Алексеевич, д-р техн. наук, профессор, профессор кафедры организации пожаротушения и проведения аварийно-спасательных работ, Санкт-Петербургский университет ГПС МЧС России, г. Санкт-Петербург, Российская Федерация; заведующий лабораторией, Институт проблем транспорта им. Н. С. Соломенко РАН, г. Санкт-Петербург, Российская Федерация; ORCID: 0000-0003-1561-2483, Scopus Author ID 57195636448, e-mail: t_54@mail.ru

ХОЛОСТОВ Александр Львович, д-р техн. наук, доцент, начальник кафедры пожарной автоматики, Академия ГПС МЧС России, г. Москва, Российская Федерация; ORCID: 0000-0003-2299-4221, e-mail: A.Holostov@academygps.ru

Information about the authors

Mikhail V. ALESHKOV, Dr. Sci. (Eng.), Professor, Deputy Head of Scientific Work, State Fire Academy of Emercom of Russia, Moscow, Russian Federation; ORCID: 0000-0001-7844-1955

Vadim A. BASOV, Deputy Head, State Fire Academy of Emercom of Russia, Moscow, Russian Federation; ORCID: 0000-0003-2779-5723

Andrey A. KOLBASIN, Cand. Sci. (Eng.), Senior Researcher, Research Department of Educational-Scientific Complex Fire and Rescue Appliances, State Fire Academy of Emercom of Russia, Moscow, Russian Federation; ORCID: 0000-0003-0140-7569

Aleksandr A. TARANTSEV, Dr. Sci. (Eng.), Professor, Professor of Department of Fire and Rescue Works, Saint Petersburg University of State Fire Service of Emercom of Russia, Saint Petersburg, Russian Federation; Head of Laboratory, Solomenko Institute of Transport Problems of the Russian Academy of Sciences, Saint Petersburg, Russian Federation; ORCID: 0000-0003-1561-2483, Scopus Author ID 57195636448, e-mail: t_54@mail.ru

Aleksandr L. KHOLOSTOV, Dr. Sci. (Eng.), Head of Fire Automation Department, State Fire Academy of Emercom of Russia, Moscow, Russian Federation; ORCID: 0000-0003-2299-4221, e-mail: A.Holostov@academygps.ru

Актуальные проблемы навигации на очаг пожара пожарных роботизированных стволов в роботизированных установках пожаротушения. Часть 1. Предпосылки создания РУП и специфические особенности тушения пожаров ПРС

© **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

Рассмотрены исторические предпосылки создания предшественников роботизированных установок пожаротушения (РУП) — установок самонаведения на очаг пожара. Представлены сведения по успешному применению мобильных роботов в военном деле, полиции, пожарной охране, беспилотной авиации, промышленности, на транспорте, в строительстве, сельском хозяйстве, социальной сфере, для облегчения условий жизнедеятельности человека, при проведении научных исследований. Показаны принципиальные отличия стационарных РУП от мобильных пожарных роботов. Указаны практические причины, препятствующие широкому применению РУП в конце прошлого столетия. Приведены краткие сведения об использовании пожарных роботизированных стволов (ПРС) для ликвидации аварии на Чернобыльской АЭС. Выполнен анализ результатов экспериментальных и теоретических исследований баллистики стоячих и сканирующих струй. Описаны основные проблемы, возникающие в процессе проектирования РУП, в состав которых входят ПРС. Показано состояние пожарной робототехники за рубежом. Отмечены лидирующие позиции России в создании и производстве ПРС, в разработке нормативной базы применительно к РУП. Сформулированы основные термины и определения в области навигации ПРС и подачи ОТВ на очаг пожара. Выполнен анализ основных положений нормативных документов по проектированию и испытанию РУП. Представлены результаты сравнительных натурных испытаний отечественной РУП и зарубежных спринклерных традиционных АУП и АУП ТРВ производства Датской компании COWI A/S. Исследованы варианты алгоритма функционирования по обнаружению пожара и навигации ствола ПРС на очаг пожара с учетом погрешностей наведения и позиционирования. Рассмотрены различные варианты реализации принципа действия современных РУП.

Ключевые слова: статические (стоячие) струи; вибрирующие струи; осциллирующие (сканирующие) струи; компактные струи; распыленный поток; фронтальные струи; навесные струи; 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 1. Предпосылки создания РУП и специфические особенности тушения пожаров ПРС // Пожаровзрывобезопасность/Fire and Explosion Safety. — 2019. — Т. 28, № 3. — С. 70–88. DOI: 10.18322/PVB.2019.28.03.70-88.

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

Actual problems of positioning of the robotic monitors to fire area in robotic fire suppression systems. Part 1. Background to the development of RFSS and specific characteristics of the fire fighting by means of RFM

© **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 historical background of the creation of the predecessors of robotic fire suppression system (RFSS) — plants homing to the fire is described. The information on the successful use of mobile robots in the military, police, fire protection, unmanned aircraft, industry, transport, construction, agriculture, social sphere, for the investment of human life conditions, during scientific research is presented. There are shown fundamental differences between stationary RFSS firefighters from mobile robots. The practical reasons preventing the implementation of the widespread use of RFSS at the end of the last century are indicated. Brief information on the use of robotic fire monitor (RFM) for liquidation of the accident at the Chernobyl NPP is given. The analysis of the results of experimental and theoretical studies of the point of standing and scanning jets is carried out. There are described the main problems encountered in the design process of RFSS, which include RFM. It is shown the status of fire robots technology abroad. Russia's positions in the creation and production of RFM, in the development of the regulatory framework in relation to RFSS have been noted. The basic terms and definitions on navigation and parameters of fire extinguishing agent supply are formulated. The analysis of the main provisions of normative documents on the design and testing of RFSS is carried out. Comparative full-scale tests of domestic RFSS and foreign sprinkler automatic fire extinguishing system are presented, made by the Denmark company COWI A/S. Variants of the algorithm of functioning of the detection and navigation of the trunk of RFM to the fire with respect to the error of aiming and positioning are investigated. Different variants of implementation of the principle of operation of modern RFSS are considered.

Keywords: static (stationary) streams; vibrating streams; oscillating (scanning) streams; compact streams; spray stream; front streams; hinged streams; targeting detector; angular coordinates; irrigation 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 1. Background to the development of RFSS and specific characteristics of the fire fighting by means of RFM. *Pozharovzryvobezopasnost'/Fire and Explosion Safety*, 2019, vol. 28, no. 3, pp. 70–88. DOI: 10.18322/PVB.2019.28.03.70-88.

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

Принятые сокращения

АУП — автоматическая установка пожаротушения;
МОП — модельный очаг пожара;
ОТВ — огнетушащее вещество;
ПРС — пожарный роботизированный ствол;
ТРВ — тонкораспыленная вода;
РУП — роботизированная установка пожаротушения;
 L_3 — длина зоны пламени с учетом погрешности наведения и зоны нечувствительности извещателя наведения в момент соприкосновения ОТВ с защищаемой поверхностью;
 $L_{пл}$ — длина пламени;
 $L_{орш}$ — длина зоны орошения;
 $L_{сопр}$ — длина соприкосновения ОТВ с защищаемой поверхностью;
 $S_{ОТВ}$ — площадь орошения;
 $S_{сопр}$ — площадь соприкосновения ОТВ с защищаемой поверхностью;
 X — коэффициент, учитывающий растекание по горизонтальной защищаемой поверхности (при интенсивности орошения, соответствующей средней интенсивности орошения эллипса); $X > 1$;
 Y — коэффициент, учитывающий стекание по вертикальной защищаемой поверхности (при интенсивности орошения, соответствующей средней интенсивности орошения эллипса); $Y > 1$;
 α — угол погрешности навигации;
 β — угол нечувствительности (мертвой зоны) извещателя наведения;
 γ — дополнительный угол орошения за счет стекания ОТВ по вертикальной защищаемой поверхности (при интенсивности орошения, соответствующей интенсивности орошения в средней части эллипса);

δ — дополнительный угол орошения за счет растекания ОТВ по горизонтальной защищаемой поверхности (при интенсивности орошения, соответствующей интенсивности орошения в средней части эллипса);
 θ — угол атаки компактной струи или распыленного потока ОТВ;
 Δ — реальный диапазон углов орошения;
 λ — расчетный диапазон углов, подлежащий орошению;
 ξ_v, ξ_r — коэффициент, учитывающий увеличение площади орошения ОТВ соответственно за счет его стекания по вертикальной или растекания по горизонтальной поверхности;
 σ — диапазон углов орошения с учетом растекания ОТВ по горизонтальной защищаемой поверхности;
 η — угол погрешности позиционирования;
 $\rho_{изв}$ — угол визирования извещателя наведения;
 $\rho_{ПРС}$ — угол возвышения ствола ПРС;
 φ — угол коррекции линии возвышения ствола ПРС относительно линии визирования пожарного извещателя наведения;
 ψ — зона активации извещателя наведения;
 ω — диапазон углов сканирования.

Основные термины и определения

Вибрирующая компактная струя или распыленный поток ОТВ: компактная струя или распыленный поток ОТВ, совершающие небольшие колебания (менее 2°) вокруг своей оси в одной или двух плоскостях;

дальность подачи огнетушащего вещества: расстояние по оси от пожарного ствола до эпицентра пятна контакта ОТВ с очагом пожара;

навесная струя: ниспадающая сверху к орошаемой поверхности струя;

осциллирующая (маятниковая) компактная струя или распыленный поток: однообразные, периодически повторяющиеся во времени колебания струи или распыленного потока по жесткой, оперативно не перепрограммируемой программе со стабильными параметрами подачи ОТВ независимо от размеров очага пожара и расстояния от него до ПРС;

погрешность позиционирования: отклонение начальных координат компактной струи, распыленного потока ОТВ или раstra сканирования по прошествии определенного времени или определенного количества циклов;

пожарный роботизированный ствол: стационарное автоматическое средство роботизированной установки пожаротушения с наведением на очаг пожара, пожарный ствол которого имеет несколько степеней подвижности, ограниченных по перемещению, и которое функционирует согласно алгоритму, предусмотренному перепрограммируемым устройством управления, обеспечивающим навигацию ствола на очаг пожара и подачу огнетушащего вещества для ликвидации или локализации пожара либо охлаждения технологического оборудования и строительных конструкций;

роботизированная установка пожаротушения: автоматическая установка пожаротушения, состоящая из совокупности нескольких взаимосвязанных пожарных роботизированных стволов, объединенных общей перепрограммируемой системой управления, для обнаружения пожара и навигации на очаг пожара;

сканирование: управляемое по определенной программе циклическое движение ствола ПРС;

сканирующая (строчная) компактная струя или распыленный поток: компактная струя или распыленный поток, формируемые ПРС и периодически перемещающиеся в горизонтальной и/или вертикальной плоскостях;

скользящая струя: струя, действующая под углом атаки к орошаемой поверхности $90^\circ > \theta > 0$;

статическая (квазистатическая), или стоячая, компактная струя либо распыленный поток: компактная струя или распыленный поток ОТВ, формируемые неподвижным стволом ПРС, с допускаемыми незначительными периодическими отклонениями (менее 1°) от осевой линии подачи огнетушащего вещества;

точность наведения ствола ПРС при подаче компактной струи или распыленного потока ОТВ: отклонение между программируемыми координата-

ми положения пожарного ствола ПРС и его реальными координатами при подаче ОТВ;

угол атаки: угол, под которым компактная струя или распыленный поток ОТВ подается на поверхность очага пожара;

угол возвышения: угол между горизонтальной плоскостью и осью ствола ПРС;

угол коррекции φ : отклонение угла возвышения ствола ПРС по отношению к углу визирования извещателя наведения;

фронтальная струя: струя, квазиперпендикулярная к фронтальной орошаемой поверхности, $\theta \approx 90$;

эффективный радиус подачи огнетушащего вещества: максимальная дальность подачи ОТВ, на конечном участке которого обеспечиваются требуемые гидравлические параметры (интенсивность и площадь орошения) для ликвидации или локализации пожара.

1. Историческая справка — предшественники современных РУП

Бурный рост производительности труда в промышленности невозможно представить без интенсивного развития и внедрения разнообразных робототехнических технологических комплексов. Этот технический прогресс явился результатом планомерных международных и национальных программ по созданию роботов различного назначения применительно к производственным и общественным задачам.

Успехи, достигнутые в последнее время в области мехатроники робототехнических систем (механики, искусственного интеллекта, средств осязания и технического зрения, программного исполнения, цифровой инженерии), позволили выйти на новые рубежи по созданию [1, 2]:

- адаптивных (осязательных) роботов, управляющая программа которых целенаправленно изменяет последовательность или характер действий в зависимости от контролируемых параметров рабочей среды и/или функционирования самих роботов;
- интеллектуальных роботов, управляющая программа которых может полностью или частично формироваться автоматически в соответствии с поставленным заданием и в зависимости от состояния рабочей среды.

Такие роботы нашли успешное применение в военном деле [3, 4], беспилотной авиации [5], полиции [6], пожарной охране [7–9], промышленности [10, 11], на транспорте [12], в строительстве [13], сельском хозяйстве [14, 15], социальной сфере [16, 17], для облегчения условий жизнедеятельности человека [18, 19], при проведении научных исследований [20].

Фактически все эти роботы, в том числе предназначенные для борьбы с пожарами, являются мобильными, выполненными на базе колесных или гусеничных шасси. И только промышленные роботы, предназначенные для сборочных, сварочных или окрасочных работ, представляют собой в основном стационарные устройства, подвижные кинематические звенья которых имеют несколько степеней свободы. Рассуждая о будущем робототехники, многие специалисты по-прежнему приоритетными направлениями считают развитие мобильных аппаратов, и прежде всего антропоморфных, сведение к минимуму агрессивности интеллектуальных роботов и исключение ошибок при взаимодействии человека и робота [21, 22].

К сожалению, современные достижения науки и техники, реализованные в области роботостроения даже в последние годы, практически не могут быть воплощены применительно к стационарным РУП по следующим причинам:

- во-первых, современные пожарные роботы являются не столько перепрограммируемыми аппаратами, сколько дистанционно управляемыми машинами;
- во-вторых, при всей кажущейся простоте РУП они должны выполнять различные функции, связанные с обнаружением пожара, определением координат наведения ствола ПРС на очаг пожара с учетом погрешности угла коррекции, выбором наиболее оптимальной баллистики статической (стоячей) или сканирующей струи ОТВ и гидравлических параметров локализации или ликвидации пожара.

В связи с этим развитие современных РУП основывается на работах, выполненных еще в СССР во второй половине XX века.

Первые попытки создания предшественников пожарных роботов — установок самонаведения на очаг пожара — были предприняты во ВНИИПО еще в середине 60-х — начале 70-х годов прошлого столетия. Были предложены три конструкции, принципиально отличающиеся друг от друга [23–25]:

- типом привода (электрический, водяной, масляный гидроприводы);
- видом чувствительных элементов извещателей (четырёхкоординатная диодная ИК-матрица, два ИК-фоторезистора, угол зрения одного из которых ограничен горизонтальной щелью, а другого — вертикальной щелью, и один УФ-счетчик фотонов, угол зрения которого зависит от щелевой диафрагмы, ограниченной сверху);
- принципиально различными способами наведения на очаг пожара (в энергетический центр пламени, на кромку пламени, под обрез пламени).

Подробное описание этих установок изложено в [26, 27].

Широкого внедрения в то время установки самонаведения не получили из-за несовершенства приводов, низкого уровня развития микропроцессорной техники и систем технического зрения. По принципу действия они обладали элементами адаптации и “жесткого” программирования, но не обладали способностью оперативно обеспечивать изменение программы управления применительно к месту возникновения пожара и фазам его развития. Существенным недостатком установок самонаведения являлась подача огнетушащего вещества при неподвижном положении ствола (стоячая струя), т. е. отсутствие сканирования стволом в пределах угловых координат фронтальной зоны пламени, локации расстояния и автоматического изменения угла возвышения пожарного ствола до объекта защиты.

Результатом дальнейшего развития автоматических установок пожаротушения стали стационарные ПРС, экспериментальные образцы которых впервые были разработаны под руководством Н. Л. Попова и Ю. И. Горбана для защиты памятников деревянного зодчества Кижи [28].

После аварии на Чернобыльской АЭС (ЧАЭС) одной из первоочередных задач являлась очистка крыши (размером порядка 110×30 м) 3-го энергоблока от радиоактивных загрязнений. По телеграмме министра МВД СССР А. В. Власова три ПРС были отправлены на ЧАЭС, установлены с помощью вертолетов на отметке 70 м кровли 3-го энергоблока и успешно использовались для удаления с нее радиоактивных обломков, кусков и пыли. Таким образом, благодаря применению РУП удалось сберечь здоровье многих людей, и в первую очередь солдат химических войск, которым эту операцию пришлось бы выполнять вручную.

Вместе с тем анализ состояния пожарной робототехники на момент аварии на Чернобыльской АЭС [29, 30] показал, что из 54 известных в тот период видов роботов только шесть являлись стационарными, причем четыре ПРС были отечественного производства (совместные разработки ЭФЭР (на тот момент Петрозаводского ПКТИ ТМ) и ВНИИПО).

Основная проблема, которая стояла перед разработчиками ПРС на первоначальном этапе, — определение влияния скорости сканирования на дальность подачи ОТВ, чтобы в дальнейшем учитывать данное обстоятельство при расчете расстояния между двумя смежными ПРС. С этой целью были проведены экспериментальные и теоретические исследования баллистики сканирующих струй (рис. 1) [31].

Аналогичные семейства зависимостей дальности подачи сканирующих компактных струй от угла наклона ствола ПЛС-20 получены в диапазоне дав-

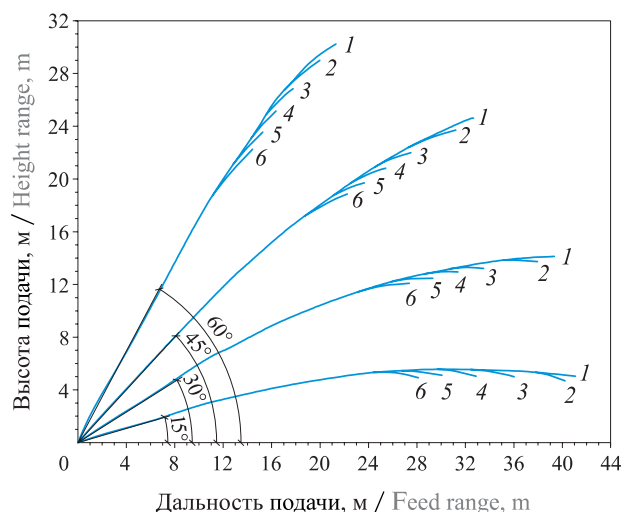


Рис. 1. Зависимость дальности подачи сканирующих компактных струй от угла наклона ствола ПЛС-20 (давление подачи 0,6 МПа, диаметр насадка 28 мм): 1 — граница компактной части стоячей (квазистатической) струи; 2 — скорость сканирования струи 3 град/с; 3 — то же, 6 град/с; 4 — то же, 9 град/с; 5 — то же, 12 град/с; 6 — то же, 18 град/с

Fig. 1. Dependence of the range of scanning straight streams on the inclination angle of the fire monitor PLS-20 (at a pressure of 0.6 MPa, nozzle diameter 28 mm): 1 — stagnant (quasi-static) straight stream part boundary; 2 — stream scanning speed 3 deg/sec; 3 — the same, 6 deg/sec; 4 — the same, 9 deg/sec; 5 — the same, 12 deg/sec; 6 — the same, 18 deg/sec

лений подачи 0,6–1,0 МПа и при диаметрах насадков 25, 28, 32 и 38 мм.

По результатам выполненных исследований баллистики сканирующих струй установлено, что в исследуемом диапазоне давлений и диаметров насадков:

- при скорости сканирования 3 град/с дальность подачи компактной части струи по сравнению с квазистатической струей снижается на 16 %, 6 град/с — на 20 %, 9 град/с — на 30 %, 18 град/с — на 50 %;
- оптимальная скорость сканирования при тушении пожара класса А не должна превышать 6 град/с, а шаг сканирования по горизонтальной плоскости на расстоянии 20–40 м при диаметре насадков 28 или 32 мм — не более 0,5 м.

Новые технологии автоматического пожаротушения, основанные на использовании РУП, в которых воплощены последние достижения науки и техники, значительно расширили технические возможности систем автоматического пожаротушения. В настоящее время в отечественной практике РУП находят все более широкое применение для противопожарной защиты протяженных помещений различного назначения, резервуарных парков, лесобирж, наземных комплексов нефтегазохимической промышленности. Известными отечественными производителями РУП являются: ООО “Инженерный центр

пожарной робототехники “ЭФЭР” и МА “Систем-сервис”, а также ООО “Уралмеханика”, компания “Нижневолжский промышленный холдинг”, ООО “Научно-производственный центр “Системы пожарной безопасности”. Причем за рубежом до сих пор ограничиваются применением дистанционно-управляемых лафетных стволов.

Россия лидирует и в создании нормативной базы применительно к РУП и ПРС. Почти 20 лет назад впервые в мировой практике были разработаны НПБ 84–2000 [32], регламентирующие общие технические требования и методы испытаний РУП. В настоящее время действует ГОСТ Р 53326–2009. Требования к РУП установлены также ст. 116 Федерального закона № 123-ФЗ “Технический регламент о требованиях пожарной безопасности” (далее — ФЗ № 123) [33].

За рубежом требования к Foam Monitors, Automatic Oscillating and Electrically Operated Monitors Systems установлены в стандарте FM 1421 [34], вступление которого в силу предполагается только 1 мая 2019 г.

Норвежская фирма COWI AS заинтересовалась применением малорасходных ПРС ТРВ типа ПР-ЛСД-С4Уш-ТРВ-ИК (производства ЭФЭР) для защиты памятников деревянного зодчества. В компании COWI A/S (Дания) были проведены сравнительные натурные испытания этих ПРС со спринклерными традиционными АУП и АУП ТРВ [35].

Испытания проводились в высоких деревянных панельных помещениях и на наружных стенах высотой от 7 до 10 м. В заключении испытаний отмечалось, что по расходу воды, времени тушения, прогоранию, площади намокания и глубине обугливания из восьми сравниваемых типов АУП наилучшие результаты продемонстрировали потолочные роботизированные насадки (имеются в виду малорасходные ПРС). Они обеспечивают регистрацию источника пожара гораздо быстрее спринклерных АУП, направленно и оперативно тушат его сосредоточенным потоком ТРВ, причем в 1,6 раза эффективнее, чем три спринклерных распылителя. При более высокой мощности пожара даже такой спринклерный ороситель, как К57 (номинальная температура срабатывания 57 °С) может оказаться абсолютно неэффективным. Высокое быстродействие и направленная подача ОТВ непосредственно в зону горения позволяют уменьшить повреждения от обугливания, воды, намокания и образования дыма. Малорасходные ПРС способны ликвидировать пожар мощностью более 3–4 МВт; при более высокой мощности пожара АУП на базе спринклерных оросителей и распылителей с номинальной температурой срабатывания 57 °С оказались абсолютно неэффективными. Масса воды, пошедшей на тушение пожаров

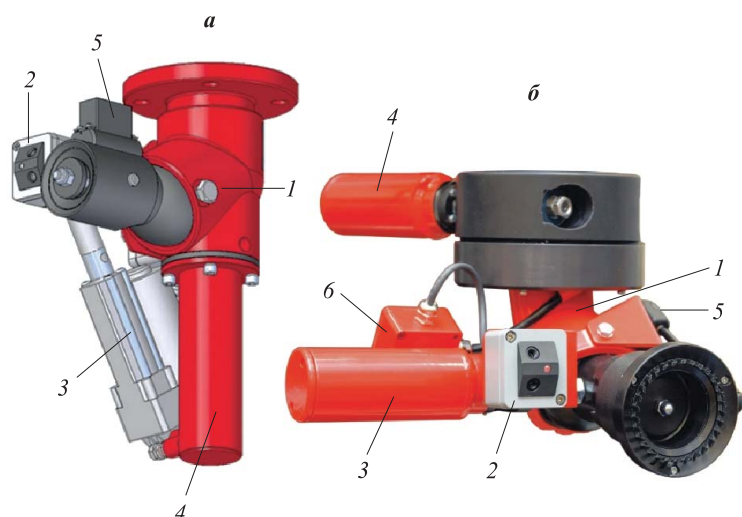


Рис. 2. Пожарные роботизированные стволы: *а* — подвесной мини-ствол ПР-ЛСД-С10Уш-ИК; *б* — подвесной мини-ствол ПР-ЛСД-С4Уш-ИК-ТРВ; 1 — ствол с насадком; 2 — извещатель обнаружения очага загорания и наведения на очаг пожара; 3 — электропривод вертикального перемещения; 4 — электропривод горизонтального перемещения; 5 — электропривод формирования компактной струи или распыленного потока; 6 — блок программного управления

Fig. 2. Robotic fire monitors: *a* — ceiling-installed mini-monitor (firefighting mini robot) FR-LSD-S10Ub-IR; *b* — ceiling-installed mini-monitor (firefighting mini robot) FR-LSD-S4Ub-IR-WM; 1 — monitor with nozzle; 2 — fire detector and fire source targeting device; 3 — vertical rotation electric drive; 4 — horizontal rotation electric drive; 5 — electric drive for the formation of a straight stream or a sprayed stream; 6 — program control unit

спринклерными АУП за 10 мин, составила 0,7–2,4 т. Малорасходные ПРС по сравнению со спринклерными АУП позволяют сократить расход воды более чем на 70 %, а обугливаемую площадь — почти в 15 раз. Спринклерными АУП пожары были потушены в течение нескольких минут менее чем в 1/3 случаев; в 1/3 случаев пожаров была достигнута их локализация, а еще в 1/3 случаев пожары в течение 10 мин вообще не были потушены (т. е. до прибытия пожарных подразделений).

Испытания по определению огнетушащей способности ПРС типа ПР-ЛСД-С10Уш-ИК и малорасходного ПРС ТРВ типа ПР-ЛСД-С4Уш-ИК-ТРВ [7] по программе и методике испытаний*, разработанным Инженерным центром пожарной робототехники “ЭФЭР”, были проведены в 2018 г. на полигоне центра.

Общий вид ПРС производства ЭФЭР приведен на рис. 2 [36].

Исходные параметры и результаты испытаний ПРС представлены в табл. 1.

При испытании двух ПР-ЛСД-С10Уш-ИК они устанавливались с одной стороны относительно МОП. В обоих испытаниях достигнуто эффективное тушение МОП.

Фотокадры испытаний приведены на рис. 3–5.

Следует отметить, что, хотя в ведущих в техническом отношении странах собственно печатные работы по РУП практически отсутствуют, тем не менее с 2016 по 2019 гг. в зарубежной периодике на эту тему было опубликовано три отечественных материала [36–38]!

* Огневые испытания. Определение параметров ликвидации пожара стационарными пожарными роботизированными стволами, входящими в состав роботизированных установок пожаротушения. Программа и методика. — М.: Петрозаводск: ООО “Инженерный центр “ЭФЭР”, ФГБУ ВНИИПО МЧС России, 2014.



Рис. 3. Расположение при испытании ПРС типа ПР-ЛСД-С10Уш-ИК на высоте 7,5 м (*а*) и 3,2 м (*б*)

Fig. 3. Location of the RFM of type FR-LSD-S10Ub-IR at a height of 7.5 m (*a*) and 3.2 m (*b*) during testing

Новые современные технологии пожаротушения с применением пожарных роботов, выполненных на базе ствольной пожарной техники, представлены в книге [39]. В ней показаны истоки создания РУП в России, последовательное в порядке преемственности совершенствование их конструкции, применение для ликвидации последствий техногенных катастроф, а также возможные аспекты их приме-

Таблица 1. Исходные параметры и результаты испытаний ПРС типа ПР-ЛСД-С4Уш-ИК-ТРВ и ПР-ЛСД-С10Уш-ИК
Table 1. The initial characteristics and the results of testing of the robotic fire monitors (RFM) of the type FR-LSD-S4Ub-IR-WM and FR-LSD-S10Ub-IR

Параметр Characteristic	ПР-ЛСД-С4Уш-ИК-ТРВ FR-LSD-S4Ub-IR-WM	ПР-ЛСД-С10Уш-ИК FR-LSD-S10Ub-IR	
		ПР 1 / FR 1	ПР 2 / FR 2
Тип модельного очага пожара (МОП) по ГОСТ Р 51057–2009 Type of standardized fire (SFS) in accordance with GOST R 51057–2009	0,5А	4А	
Расстояние между ПРС и МОП, м Distance between RFM and SFS, m	12,0	26,5	25,0
Расстояние между ПРС 1 и ПРС 2, м Distance between RFM 1 and RFM 2, m	–	20	
Высота ПРС над уровнем земли, м RFM altitude above ground level, m	3,2	7,5	3,2
Высота основания МОП над уровнем земли, м SFS base height above ground level, m	0,4	0,8	
Давление ОТВ у ПРС, МПа RFM pressure of fire extinguishing agent (FEA), MPa	0,4	0,6	0,6
Расход ПРС, л/с / RFM flow rate, l/sec	4	10	10
Угловая скорость сканирования ПРС в процессе подачи ОТВ на МОП, град/с RFM angular velocity scanning at FEA supply, deg/sec	3		
Угол сканирования относительно центра МОП, град Scanning angle with relative to the SFS center, deg:			
– по горизонтали / horizontal	± 10	± 5	± 3
– по вертикали / vertical	–	5	10
Время начала подачи ОТВ с момента поджига МОП, мин:с FEA supply starting time from the moment of the SFS ignition, min:sec	08:49	11:26	
Продолжительность ликвидации пожара до полного прекращения горения МОП с момента подачи ОТВ, мин:с Duration of fire extinguishing until complete SFS burnout from the moment of the FEA supply, min:sec	6:40	7:58	

нения для защиты уникальных объектов различного назначения. Рассмотрены основные понятия по гидравлике в пожарном деле и баллистике струй, а также по огнеопасным материалам и огнетушащим веществам, применяемым в ствольной технике.

Принцип действия современных РУП может быть реализован в нескольких вариантах, например:

- система общего обзора РУП регистрирует пожар, определяет размеры и относительные координаты очага загорания и выдает команду на наведение на него одной или нескольких ПРС; после наведения на очаг пожара соответствующих ПРС они начинают в заданном программой режиме подавать ОТВ в зону горения;
- система общего обзора РУП регистрирует пожар и выдает команду на соответствующее количество входящих в ее состав ПРС на поиск очага пожара; после обнаружения очага извещателем наведения первого из ПРС он через систему управления определяет размеры и относительные ко-

ординаты пламени и выдает команду на наведение на объект защиты пожарного ствола ПРС.

Система управления РУП позволяет обеспечить формирование нескольких запрограммированных режимов подачи ОТВ в виде как стоячей, так и сканирующей компактной струй или распыленного потока. Остальные ПРС либо наводятся по указанию системы управления РУП на этот же очаг пожара, либо, если этого не требуется, не принимают участия в тушении пожара. Угол струи может варьироваться в пределах до 90° включ.

Существенным преимуществом РУП перед спринклерными АУП является возможность обнаруживать и ликвидировать очаг пожара площадью всего 0,1 м², сосредоточив подачу ОТВ с одинаковым нормативным расходом как для АУП, так и для РУП. Для РУП продолжительность регистрации и наведения на очаг пожара ПРС составляет не более 30 с, а для спринклерных АУП превышает 5 мин. Однако за 5 мин пожар может принять неконтроли-



МОП / SFS



00:00 Поджиг / 00:00 Ignition



05:00 Развитие пожара / 05:00 Fire development



11:00 Развитие пожара / 11:00 Fire development



11:26 Начало тушения / 11:26 Start of extinguishing



11:40 Тушение / 11:40 Extinguishing



13:55 Тушение / 13:55 Extinguishing



17:47 Тушение / 17:46 Extinguishing



19:24 Конец тушения / 19:24 End of extinguishing



Результат тушения / Result of extinguishing

Рис. 4. Испытание ПРС типа ПР-ЛСД-С10Уш-ИК по тушению МОП ранга 4А

Fig. 4. Testing of the RFM of type FR-LSD-S10Ub-IR at extinguishing of the SFS class 4A



00:00 Поджиг МОП / 00:00 Ignition of SFS



03:30 Развитие пожара / 03:30 Fire development



08:35 Развитие пожара / 08:35 Fire development



08:49 Начало тушения / 08:49 Start of extinguishing



09:19 Тушение / 09:19 Extinguishing



13:00 Тушение / 13:00 Extinguishing



15:29 Конец тушения / 15:29 End of extinguishing



Результат тушения / Result of extinguishing

Рис. 5. Испытание ПРС ТРВ типа ПР-ЛСД-С4Уш-ИК-ТРВ по тушению МОП ранга 0,5А (высота ПРС ТРВ 3,2 м)

Fig. 5. Testing of the water mist RFM of type FR-LSD-S4Ub-IR-WM at extinguishing of the SFS class 0.5A (the height of the water mist RFM is 3.2 m)

руемый характер, который не всегда поддается даже локализации.

Вместе с тем следует учитывать, что любая угловая погрешность (навигации, атаки ОТВ, позиционирования, визирования извещателя наведения или возвышения ствола ПРС), составляющая 1° , на расстоянии 20 м приводит к смещению компактной струи или распыленного потока ОТВ либо траектории сканирования на 0,35 м, при погреш-

ности 2° величина смещения практически удваивается. Много это или мало 1 и 2° ? Допустим, что угловая погрешность относительно пламени двухсторонняя. Тогда для пятна ОТВ, имеющего в момент соприкосновения с объектом защиты диаметр 0,5 м, его необходимо увеличить соответственно на 0,7 и 1,4 м. Увеличится и площадь орошения с 0,2 до 1,13 и 2,84 м^2 . Однако при неизменном расходе значительно сократится интенсивность орошения:

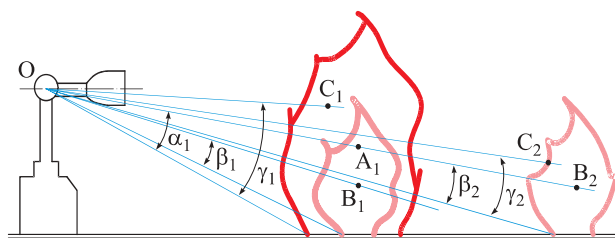


Рис. 6. Способы подачи ОТВ на очаг пожара из ПРС: A_1, B_1 — энергетические центры большого и меньшего по размерам пламен, находящихся на равном расстоянии от ПРС; B_2 — энергетический центр удаленного пламени; C_1, C_2 — точки, находящиеся на контурах пламен; $\alpha_1, \beta_1, \beta_2, \gamma_1, \gamma_2$ — угловые координаты подачи ОТВ относительно обреза пламени

Fig. 6. The supply methods of the FEA to the fire from RFM: A_1, B_1 — energy centers of the larger and the smaller flames that are at equal distance from the RFM; B_2 — energy center of the remote flame; C_1, C_2 — points located on the contours of the flames; $\alpha_1, \beta_1, \beta_2, \gamma_1, \gamma_2$ — the angular coordinates of the FEA supply relative to the flame edge

соответственно в 5,65 и 14 раз! Если же произойдет суммирование погрешностей для нескольких углов, то интенсивность орошения еще более резко упадет. Тем не менее даже при этих условиях и обеспечении квазиравномерности орошения, например, за счет вибрирующей или осциллирующей подачи ОТВ интенсивность орошения будет составлять порядка $0,5 \text{ л}/(\text{с} \cdot \text{м}^2)$, т. е. для группы помещений 1 будет превышать нормативное значение для спринклерного оросителя в 6,25 раз.

Для подвесных ПРС наиболее целесообразно обеспечить подачу ОТВ в энергетический центр пламени. Однако для напольных ПРС ни этот способ, ни тем более способ наведения на какую-либо произвольную точку, находящуюся на контуре пламени, при небольших расстояниях между стволом и очагом пожара и значительных размерах пламени не дает удовлетворительных результатов по эффективности тушения, так как ОТВ не воздействует непосредственно на зону горения, а проникая сквозь высокотемпературную зону, орошает не подверженную огню удаленную площадь.

Угол наведения при одном и том же расстоянии между очагом пожара и визированием лафетного ствола зависит от размеров пламени (рис. 6) [26, 27].

Например, при одинаковом удалении от пожарного ствола, но при различной высоте и площади очага горения энергетические центры большого A_1 и меньшего по размеру пламен B_1 имеют различные полярные координаты относительно оси ствола O . Угол наведения в зону пламени также зависит от его размеров: чем больше пламя, тем значительнее расхождение по углу наведения ($\alpha_1 > \beta_1$).

Угловая разность наведения на любую точку, находящуюся на контуре пламени, например C_1 или C_2 , может иметь еще большее значение ($\gamma_1 \gg \beta_1; \gamma_2 \gg \beta_2$).

В связи с этим при тушении пожаров класса В для напольных РУП наиболее предпочтительным является способ подачи ОТВ под обрез пламени, так как при этом вне зависимости от его размеров доставка огнетушащего вещества осуществляется непосредственно в зону горения, вследствие чего существенно повышается эффективность тушения пожара.

2. Особенности тушения пожаров стоячими (статическими) и сканирующими струями ПРС

В связи со значительными достижениями в области конструирования ПРС и программного обеспечения РУП, с широким внедрением этих технических средств для противопожарной защиты объектов различного назначения основной акцент в исследовательских работах перенесен на решение практических вопросов, связанных с разработкой нормативных требований по проектированию РУП.

Основные проблемы в процессе проектирования РУП, в состав которых входят ПРС, возникают при определении расстояния между смежными ПРС; выборе способа обнаружения очага пожара; определении угла возвышения ствола ПРС относительно этого очага, допустимых размеров очага пожара (площади пожара, которую необходимо подвергнуть орошению); выборе типа струи или потока ОТВ (компактная или распыленная, стоячая, вибрирующая, маятниковая или сканирующая), способа определения расстояния до очага, характера баллистики струй (навесная или действующая по фронту объекта защиты); при решении вопроса о том, чего необходимо достичь при подаче ОТВ — накрыть струей сразу весь очаг пожара или обеспечить сканирование в пределах горящей поверхности.

Именно эти навигационные параметры определяют в дальнейшем вычисление расхода ОТВ и интенсивности орошения поверхности объекта защиты при воздействии на нее водяной струи.

Проекция орошаемого пятна навесных или фронтальных статических (стоячих) либо строчных сканирующих струй, формируемых стволом ПРС, в зависимости от угла, под которым подается струя на объект защиты, как частный идеальный случай может иметь форму круга или чаще — вытянутого эллипса.

Тушение пожаров стоячими или строчными сканирующими струями (фронтальными, скользящими или навесными), формируемыми ПРС, имеет ряд существенных особенностей по сравнению с тушением пожаров распыленными потоками, диспергируемыми из оросителей спринклерных и дренчерных АУП, которые необходимо учитывать при проектировании пожарной защиты объекта:

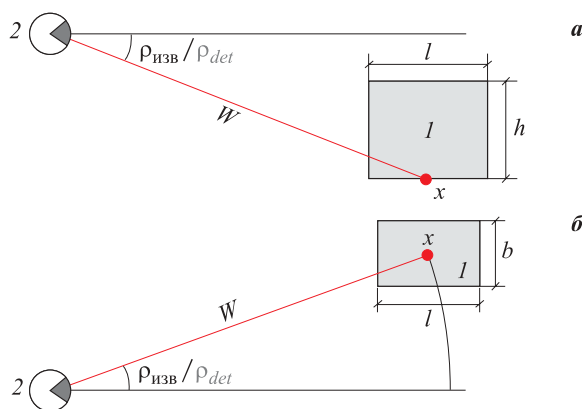


Рис. 7. Примеры визирования извещателя наводнения на очаг пожара: а — фронтальное, под обрез пламени; б — по центру горизонтальной поверхности пожарной нагрузки (или по энергетическому центру); I — объект защиты; 2 — извещатель наводнения на очаг пожара; W — линия визирования извещателя; l, b, h — соответственно длина, ширина (глубина) и высота объекта защиты; x — точка визирования извещателя; $\rho_{изв}$ — угол визирования извещателя наводнения

Fig. 7. Examples of sighting of the fire targeting detector: а — frontal, to the edge of the flame; б — to the centre of the horizontal surface of the fire load (or energy centre); I — protected object; 2 — fire targeting detector; W — detector sighting line; l, b, h — length, breadth and height of the protected object; x — detector sighting point; ρ_{det} — sighting angle of the fire targeting detector

- прежде чем приступить к тушению пожара в соответствии с алгоритмом функционирования ПРС, должно быть предусмотрено автоматическое определение координат загорания, поиск пламени и ориентация на него ствола ПРС (рис. 7);
- тушение пожара может осуществляться как статическими (стоячими), вибрирующими, осциллирующими (маятниковыми), так и сканирующими (перемещающимися в угловых координатах) струями;
- при строчном сканировании стволом ПРС каждая точка защищаемой зоны подвергается воздействию пятна ОТВ периодически;
- длина и количество строк в растре сканирования зависят от вида, типа и габаритных размеров защищаемой пожарной нагрузки (расположения горючих материалов, технологического оборудования и т. п.), а также от диаметра компактной струи или распыленного потока ОТВ;
- при защите объекта определенных линейных размеров диапазон углов сканирования, а следовательно, и продолжительность цикла сканирования зависят от расстояния между ПРС и защищаемой зоной;
- диапазон углов сканирования, кроме предельно допустимых линейных размеров в ширину и глубину пожарной нагрузки, определяется также погрешностью навигации ствола ПРС на очаг по-

жара (погрешностью наведения и позиционирования, т. е. отработки циклической программы);

- алгоритм наведения ПРС на очаг пожара, вид технических средств обнаружения пожара, координаты наведения пожарного ствола на очаг пожара выбираются в зависимости от класса сложности решаемых задач (рис. 8);
- необходимость подачи струи ОТВ под обрез или в эпицентр пламени регламентируется агрегатным состоянием пожарной нагрузки и видом ОТВ;
- дальность подачи струи зависит от скорости сканирования, давления у ПРС и угла возвышения ствола ПРС;
- подача струи ОТВ (компактной или распыленной) должна осуществляться с учетом угла коррекции, а также в зависимости от расстояния между ПРС и защищаемым объектом (очагом пожара) (рис. 9).

Чем больше расстояния L и l между стволом ПРС и очагом пожара, тем, соответственно, больше углы ϕ , $\rho_{ПРС}$ и $\rho_{изв}$. При $L > l$ имеем: $\phi_L > \phi_l$; $\rho_{ПРС-L} > \rho_{ПРС-l}$; $\rho_{изв-L} > \rho_{изв-l}$.

При проектировании РУП может быть реализован один из вариантов алгоритма функционирования по обнаружению пожара и навигации ствола ПРС на очаг пожара:

1 — регистрация очага пожара пожарным извещателем общего обзора или пожарным зонным извещателем с последующей выдачей соответствующей команды на один или несколько ПРС для наведения на очаг пожара;

2 — регистрация очага пожара системой технического зрения (СТЗ) с последующей выдачей соответствующих координат загорания для автоматического наведения одного или нескольких ПРС непосредственно на очаг пожара.

В процессе навигации и тушения пожара система управления РУП должна автоматически принимать решения по определению:

- способа подачи струи ОТВ на очаг пожара (навесным распыленным потоком, сканирующими струями или только одной струей под обрез пламени);
- величины угла факела струи ОТВ в зависимости от дальности подачи струи;
- изначальной подачи ОТВ (на горизонтальную или вертикальную поверхность, выше кромки защищаемой площади, в эпицентр горения, под обрез пламени или на боковой абрис);
- угла коррекции (в зависимости от дальности и давления подачи струи ОТВ).

При тушении пожарной нагрузки из твердых горючих материалов небольшой высоты, расположенной на горизонтальной поверхности, или про-



Рис. 8. Алгоритм наведения РПС на очаг пожара / Fig. 8. Algorithm of the FEA targeting onto the fire source

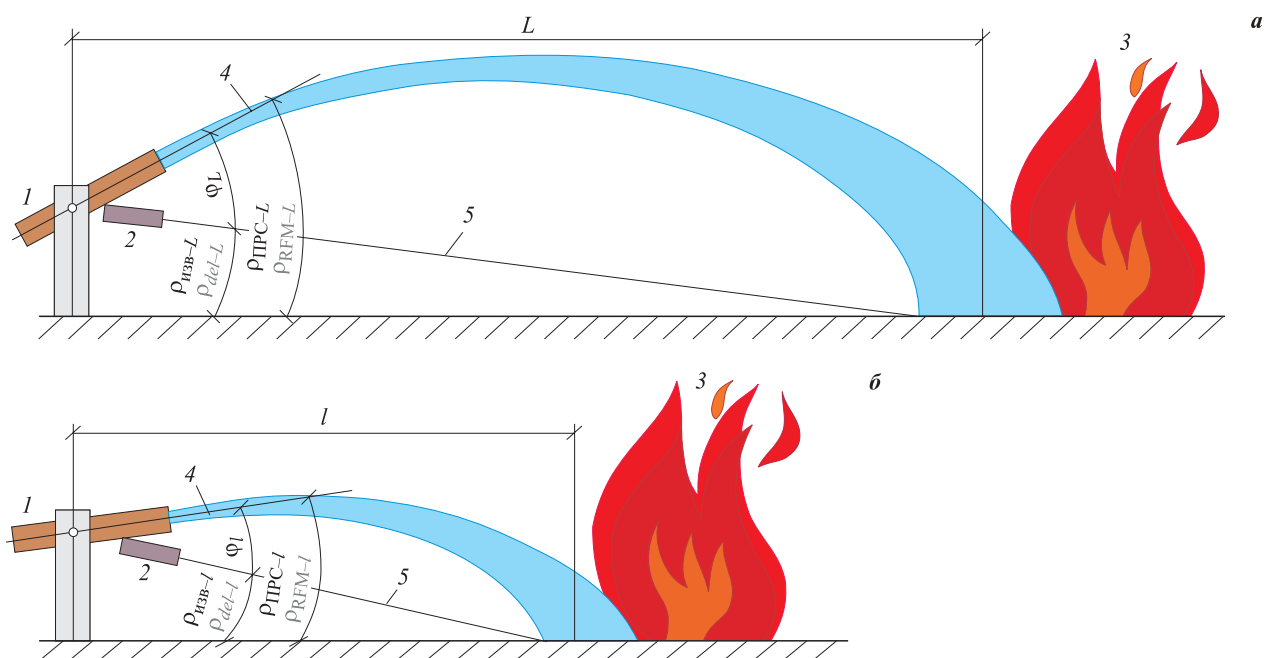


Рис. 9. Зависимость угла коррекции от расстояния между РПС и очагом пожара: а — при $L \geq l$; б — при $l \leq L$; 1 — РПС; 2 — извещатель наведения; 3 — очаг пожара; 4 — линия возвышения ствола РПС; 5 — линия визирования извещателя наведения; L, l — расстояние до очага пожара; $\rho_{РПС-L}, \rho_{РПС-l}$ — угол возвышения ствола РПС; $\rho_{изв-L}, \rho_{изв-l}$ — угол визирования извещателя наведения; φ_L, φ_l — угол коррекции

Fig. 9. The dependence of the correction angle on the distance between the RFM and the fire source: а — at $L \geq l$; б — at $l \leq L$; 1 — RFM; 2 — targeting detector; 3 — source of fire; 4 — RFM elevation line; 5 — detector sighting line; L, l — the distance to the fire source; $\rho_{RFM-L}, \rho_{RFM-l}$ — elevation angle of the RFM; $\rho_{det-L}, \rho_{det-l}$ — sighting angle of the fire targeting detector; φ_L, φ_l — correction angle

ливов жидкости ОТВ необходимо подавать под обрез пламени. При защите технологического оборудования сложной конфигурации целесообразно осуществлять орошение несколькими сканирующими

ми строками. При защите вертикальных поверхностей от тепловых воздействий может быть достаточно одной сканирующей строки в заданную зону (например, по верхней кромке этой поверхности).

3. Основные положения нормативных документов по проектированию и испытанию РУП

Основные требования и методы испытаний РУП и ПРС приведены в ГОСТ Р 53326–2009, а общие положения по проектированию — в СП 5.13130.2009 [40] (далее — СП 5) и в ВНПБ-СТО [41]. Однако при проектировании РУП применительно к конкретному объекту защиты возникает неопределенность: какие предельные по площади очаги пожара могут быть ликвидированы или локализованы, с каким расходом ОТВ и на каком расстоянии до ПРС (поскольку эти сведения в нормативных документах отсутствуют).

Перед проектированием РУП необходимо определиться с максимально допустимыми размерами очага пожара (в том числе с учетом погрешности навигации на очаг пожара и погрешности позиционирования), при которых еще можно обеспечить ликвидацию или локализацию пожара, так как именно эти параметры определяют давление и расход ОТВ, а также связанную с ними баллистику компактной струи или распыленного потока. Однако диапазон сканирования стволом ПРС определяется не только допустимыми размерами очага пожара, но и погрешностями навигации на него и позиционирования.

В свою очередь, допустимые размеры очага пожара зависят от чувствительности и быстродействия аппаратуры обнаружения загорания и продолжительности навигации ствола ПРС на очаг пожара, погрешностей навигации и позиционирования. Быстродействие обнаружения загорания определяется чувствительностью СТЗ, извещателя общего обзора (или зонных извещателей) или извещателя

наведения, обеспечивающих с заданной точностью навигацию ствола ПРС по наведению компактной струи или распыленного потока ОТВ на очаг пожара. Чувствительность СТЗ и извещателей зависит от интенсивности излучения пламени, его спектральной характеристики и расстояния до очага пожара.

Согласно ГОСТ Р 53326–2009 чувствительность извещателей проверяется по методике, изложенной в ГОСТ Р 50898–96 применительно только к тестовому очагу пламени ТП-5 (табл. 2). Но даже если учитывать и другие очаги пожара, например ТП-2, ТП-4, ТП-6, то и они не исчерпывают всего многообразия горючих материалов.

Допустимое по ГОСТ Р 50898–96 быстродействие извещателей (180–510 с) слишком велико, но даже если при реальном очаге пожара время срабатывания будет меньше, то насколько? При принятой угловой скорости наведения 9 град/с, расстоянии всего примерно 20 м до объекта защиты и при быстродействии порядка 1 с пробег по фронтальной плоскости очага пожара составит около 3 м. Сократить это время до минимума можно при условии, что регистрация пожара осуществляется СТЗ с последующей выдачей соответствующих координат загорания для автоматической навигации ствола ПРС непосредственно на очаг пожара или закрепленным на ПРС извещателем наведения, который в процессе навигации и поиска очага пожара совершает движение одновременно со стволом ПРС в вертикальной и горизонтальной плоскостях и фиксирует начальные и конечные координаты очага пожара. Следует отметить, что будущее несомненно за системой технического зрения. В настоящее время проводятся интенсивные работы по применению СТЗ в качестве самостоятельной системы пожар-

Таблица 2. Время срабатывания извещателя на тестовый очаг пожара / **Table 2.** Detector response time to test fire source

Тестовый очаг пожара Test fire source	Характеристика тестового очага пожара Test fire source characteristic	Время срабатывания извещателя, с, не более Detector response time, sec, not more than
ТП-2 Горение древесины TP-2 Wood burning	70 буковых брусков размером 10×20×250 мм каждый, уложенных в 7 слоев 70 beech bars of 10×20×250 mm each, laid in 7 layers	370
ТП-4 Горение полимерных материалов TP-4 Polymer materials burning	3 мата из пенополиуретана размером 500×500×20 мм каждый 3 polyurethane foam mats of 500×500×20 mm each	180
ТП-5 Горение ЛВЖ с выделением дыма TP-5 HFL burning with smoke	650 г смеси гептана (97 % об.) и толуола (3 % об.) в поддоне размером 330×330×50 мм 650 g of a heptane (97 % vol.) and toluene (3 % vol.) mixture in a pallet of 330×330×50 mm	240
ТП-6 Горение ЛВЖ без выделения дыма TP-6 HFL burning without smoke	2000 г смеси этилового (90 % об.) и метилового (10 % об.) спирта в поддоне размером 435×435×50 мм 2000 g of mixture of an ethyl (90 % vol.) and methyl (10 % vol.) alcohol in a pallet of 435×435×50 mm	510

ной сигнализации и аппаратуры обнаружения загораний в составе АУП.

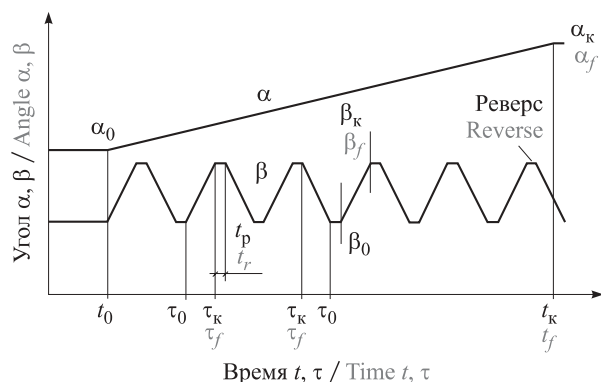


Рис. 10. Угловые перемещения ствола ПРС при наведении на очаг пожара: α, β — угловые перемещения ствола ПРС соответственно в горизонтальной и вертикальной плоскостях; $\alpha_0, \alpha_k, \beta_0, \beta_k$ — то же, в начальном и конечном положении цикла поиска; t, τ — продолжительность перемещения соответственно в горизонтальной и вертикальной плоскостях; t_0, t_k, τ_0, τ_k — то же, в момент соответственно начала и окончания цикла поиска; t_r — продолжительность реверса

Fig. 10. Angular rotations of the monitor RFM during targeting at the fire source: α, β — angular rotations of the monitor RFM in the horizontal and vertical planes; $\alpha_0, \alpha_k, \beta_0, \beta_k$ — the same, in the initial and final position of the search cycle; t, τ — duration of the rotation in the horizontal and vertical planes; t_0, t_k, τ_0, τ_k — the same, at the start and the end of the search cycle; t_r — reverse duration

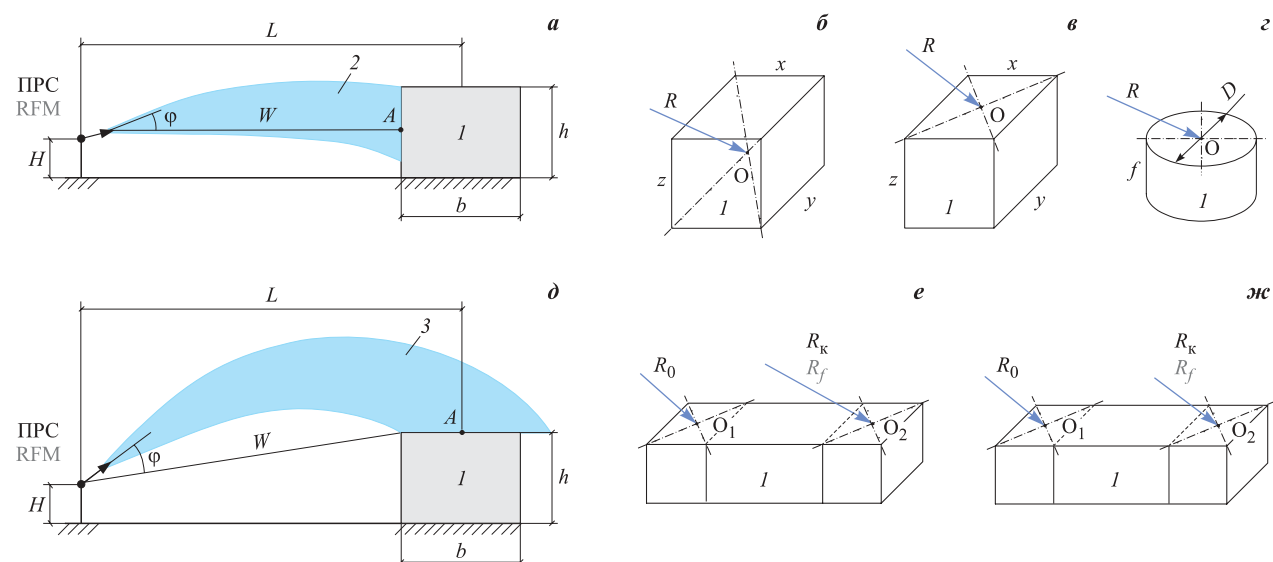


Рис. 11. Виды струй: а, б — фронтальная; в–ж — навесная; а–в, д, е — очаг пожара класса А; г, ж — очаг пожара класса В; а–д — статическая (стоячая) струя; е, ж — сканирующая струя; 1 — объект защиты; 2 — фронтальная струя; 3 — навесная струя; L — расстояние между ПРС и объектом защиты; φ — угол коррекции (между осью визирования извещателя наведения и осью ствола ПРС); R — направление подачи струи; W — линия визирования извещателя наведения; h, b — соответственно высота и ширина (глубина) объекта защиты; H — высота оси вращения ствола ПРС

Fig. 11. Types of streams: а, б — frontal; в–ж — high-angle; а–в, д, е — fire source of a class А; г, ж — center of fire source of a class В; а–д — static (stationary) stream; е, ж — scanning stream; 1 — protected object; 2 — frontal stream; 3 — high-angle stream; L — distance between the RFM and the protected object; φ — the correction angle (between the detector sighting axis and the RFM axis); R — the stream direction; W — detector sighting line; l, b, h — length, breadth (depth) and height of the protected object; H — the RFM rotation axis height

Графики угловых перемещений ствола ПРС в горизонтальной и вертикальной плоскостях при наведении на очаг пожара приведены на рис. 10.

В реальных условиях спектральная характеристика пожара может существенным образом отличаться от тестового очага пожара. Высокая чувствительность извещателя по ГОСТ Р 50898–96, например, к очагу ТП-5 никак не означает, что он обладает приемлемой чувствительностью к спектру излучения пламени реального очага пожара.

Извещатель наведения, осуществляющий поиск и регистрацию угловых координат пожара, имеет зону нечувствительности β с обеих сторон пламени, на которую он не реагирует. На практике струя наводится на очаг пожара, во-первых, с определенной погрешностью навигации на угол α и погрешностью позиционирования на угол η , связанными со специфическими особенностями кинематики механизма привода и системы управления ПРС. Согласно ГОСТ Р 53326–2009 максимальная погрешность угла α не должна превышать 2° .

В методике определения погрешностей навигации и позиционирования ствола ПРС, приведенной в ГОСТ Р 53326–2009, не указывается, каким образом эти погрешности должны быть учтены при проектировании РУП и каким образом они будут влиять на принятый расход ОТВ. В связи с этим возникают проблемы и при обосновании расхода ОТВ, так как

отсутствуют рекомендации по предельно допустимым погрешностям, при которых правомерно заимствование из табл. 5.1–5.3 СП 5 [40].

Следует учесть, что преимуществом РУП перед спринклерными АУП является возможность тушить начальный очаг загорания всем расходом (нормативно приравненным для обоих видов установок), что на ранних стадиях загорания по быстродействию и эффективности на порядок выше показателей спринклерных АУП. При увеличении площади очага интенсивность, естественно, снижается.

Вместе с тем надо учитывать различия в структуре и форме потока, генерируемого оросителями АУП и стволом ПРС. Для любого типа оросителя основным параметром, влияющим на эффективность тушения пожара, является интенсивность орошения в пределах определенной защищаемой площади. По-

ток ОТВ из традиционного оросителя, как правило, направлен вниз перпендикулярно горизонтальной поверхности, поэтому проекция орошаемого пятна представляет собой площадь круга. Ствол ПРС может формировать как статические, так и сканирующие струи (фронтальные, навесные), причем вектор скорости струи в зависимости от расположения ПРС относительно защищаемого объекта может быть направлен вверх, горизонтально или вниз (рис. 11).

Согласно п. 7.1.9 СП 5 [40] каждая точка помещения или защищаемого оборудования должна находиться в зоне действия не менее двух ПРС, причем они могут быть расположены как с одной стороны относительно объекта защиты, так и с противоположных сторон.

Продолжение 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 // *HRPR 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 A62C 37/10 (2000.01), A62C 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 A62C 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., Верещагин С. Н.* Современная пожарная робототехника : обзорная информация. — М. : ГИЦ МВД СССР, 1988. — 42 с.
30. *Мешман Л. М., Пивоваров В. В., Гомозов А. В., Верещагин С. Н.* Пожарная робототехника. Состояние и перспективы использования : обзорная информация. — М. : ВНИИПО МВД СССР, 1992. — 82 с.
31. *Мешман Л. М., Верещагин 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; опублик. 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. ВНПБ 39–16 (СТО 1682.0017–2015). Роботизированная установка пожаротушения. Нормы и правила проектирования. — М. : ВНИИПО МЧС России, 2016. — 84 с.

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 rynek 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-Analiticheskoe-issledovanie-mirovogo-rinka-robototekhniki-%28yanvar-2016%29.pdf](http://robotforum.ru/assets/files/000%20News/NAURR-Analiticheskoe-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 pozharo- i vzryvoshchita 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 German).
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. Gomofov, 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 pozharной avtomatike i pozharной 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).

Поступила 12.01.2019; после доработки 20.02.2019; принята к публикации 22.02.2019
Received 12 January 2019; received in revised form 20 February 2019; accepted 22 February 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

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

С именем Леонида Мунеевича МЕШМАНА связано новое направление в пожарном деле — пожарные роботы и пожарная робототехника. Именно он возглавил во ВНИИПО это научное направление, ввел новые термины, понятия и нормы пожарной безопасности. Он продвигал эту новую технику в Кижих и Чернобыле, на АЭС и ТЭЦ. Результатом этой многолетней работы явилось то, что Россия стала первой страной мира, где законодательно и нормативно введен новый вид автоматических установок пожаротушения — роботизированные установки пожаротушения, которые в настоящее время защищают сотни значимых объектов по всей стране и за рубежом.

С уважением, Ю. Горбань

<https://doi.org/10.18322/PVB.2019.28.03.89-97>

УДК 614.842.6

Совершенствование информационного обеспечения групп разведки пожара при его мониторинге в здании с использованием инфракрасных технологий

© Н. Г. Топольский¹, Д. В. Тараканов², К. А. Михайлов^{1✉}, А. В. Мокшанцев¹

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

² Ивановская пожарно-спасательная академия ГПС МЧС России (Россия, 153040, г. Иваново, просп. Строителей, 33)

РЕЗЮМЕ

Введение. Тактические возможности групп разведки пожара зависят от различных факторов, усложняющих их работу. Немаловажным является использование информации от мобильных и стационарных систем мониторинга пожара. Целью настоящей работы является оценка тактических возможностей групп разведки пожара при его мониторинге в здании с использованием инфракрасных технологий. В работе решены две задачи: проведен анализ электромагнитного светового спектра; разработана модель оценки тактических возможностей групп разведки пожара при мониторинге пожара в здании с использованием коротковолновых инфракрасных технологий.

Методика. В работе использованы математические методы, включая метод разложения нормализованного показателя тактических возможностей в ряд Тейлора для описания тактических возможностей групп разведки на пожаре.

Результаты и их обсуждение. На основании расчетов производительности и площади зоны поиска групп разведки построены графики зависимости площади зоны поиска от показателя тактических возможностей групп разведки пожара и нормализованного показателя тактических возможностей групп разведки пожара. Показано, что производительность групп разведки зависит от скорости движения звеньев газодымозащитной службы (ГДЗС), количества звеньев, эффективного расстояния между звеньями и условий видимости. В работе предлагается использовать коротковолновые инфракрасные камеры для улучшения видимости в дыму при поиске и спасении пострадавших.

Выводы. В итоге система информационной поддержки принятия решений с использованием инфракрасных технологий улучшит на 10–15 % видимость для звеньев ГДЗС, а также их координацию. Это, в свою очередь, позволит повысить оперативность принятия управленческих решений при поиске и спасении пострадавших в непригодной для дыхания среде.

Ключевые слова: мониторинг пожара; коротковолновые инфракрасные технологии; тактические возможности; звено ГДЗС; информационное обеспечение.

Для цитирования: Топольский Н. Г., Тараканов Д. В., Михайлов К. А., Мокшанцев А. В. Совершенствование информационного обеспечения групп разведки пожара при его мониторинге в здании с использованием инфракрасных технологий // Пожаровзрывобезопасность/Fire and Explosion Safety. — 2019. — Т. 28, № 3. — С. 89–97. DOI: 10.18322/PVB.2019.28.03.89-97.

✉ Михайлов Кирилл Андреевич, e-mail: mihkir.94@mail.ru

Improvement of information support fire intelligence groups at fire building monitoring using infrared technology

© Nikolay G. Topolskiy¹, Denis V. Tarakanov², Kirill A. Mikhaylov^{1✉}, Aleksandr V. Mokshantsev¹

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

² Ivanovo Fire and Rescue Academy of State Firefighting Service of Emercom of Russia (Stroiteley Avenue, 33, Ivanovo, 153040, Russian Federation)

ABSTRACT

Introduction. The tactical capabilities of fire intelligence groups depend on various factors. It is also important to use information from mobile and stationary fire monitoring systems. The aim of this work is to assess the tactical capabilities of fire intelligence groups without using and using infrared technologies in the fire monitoring system.

The paper solves two problems: the analysis of the electromagnetic light spectrum; a model for assessing the tactical capabilities of fire intelligence groups in the monitoring of fire in the building using short-wave infrared technologies.

Methods. In the paper there were used mathematical methods, including the method of decomposition of the normalized index of tactical capabilities in the Taylor series to describe the tactical capabilities of intelligence groups in the fire.

Results and discussion. Based on the calculations of the performance and the area of the search area for intelligence teams, the graphs of the search area versus the indicator of the tactical capabilities of the fire intelligence groups and the normalized indicator of the tactical capabilities of the fire intelligence groups were plotted. It is shown that the performance of the intelligence teams depends on the speed of the units of the gas and smoke protection service, the number of units, the effective distance between the units and visibility conditions. In the paper it was proposed the use of short-wave infrared cameras to improve visibility in the smoke during the search and rescue of victims.

Conclusion. In the end, it is assumed that the system using infrared technologies will improve 10–15 % visibility for fire links, as well as improve the coordination of fire links. This, in turn, will allow to increase the efficiency of management decision-making in the search and rescue of victims in an inhospitable environment.

Keywords: fire monitoring; short-wave infrared technology; tactical capabilities; fire unit; information support.

For citation: N. G. Topolskiy, D. V. Tarakanov, K. A. Mikhaylov, A. V. Mokshantsev. Improvement of information support fire intelligence groups at fire building monitoring using infrared technology. *Pozharovzryvobezopasnost/ Fire and Explosion Safety*, 2019, vol. 28, no. 3, pp. 89–97 (in Russian). DOI: 10.18322/PVB.2019.28.03.89–97.

✉ Kirill Andreevich Mikhaylov, e-mail: mihkir.94@mail.ru

Введение

Спецификой работы пожарных подразделений при тушении пожаров в зданиях обуславливается наличие ряда факторов, усложняющих данный процесс. Во многих практических случаях, рискуя собственной жизнью, участники тушения пожара проводят работы под воздействием опасных факторов пожара (ОФП). Отсутствие достаточной видимости при тушении пожара является фактором, одновременно снижающим эффективность действий и определяющим особые психологические условия, в которых пожарным приходится принимать ответственные решения.

В свою очередь, обстановка с пожарами на пожаровзрывоопасных объектах Российской Федерации определяет необходимость постоянного повышения уровня готовности к борьбе с ними. Одним из направлений повышения эффективности действий пожарных подразделений по тушению пожаров в условиях воздействия ОФП в зданиях пожаровзрывоопасных объектов является совершенствование информационного обеспечения. Однако информация, являясь одним из наиважнейших видов ресурсов для эффективного ведения действий по тушению пожара, в случае ее избыточности или противоречивости может привести к снижению оперативности принимаемых участниками тушения пожара решений, что в условиях воздействия на них опасных факторов пожара крайне нежелательно. Следовательно, любые дополнительные средства информационного обеспечения действий по тушению пожара, приводящие к увеличению объема информации, должны быть критически оценены с точки зрения эффективности их применения. В практике совершенствования информационного обеспечения пожарных подразделений, осуществляющих

тушение пожара, сформированы процедуры оценки эффективности действий по тушению пожара на основе показателей их тактических возможностей. В контексте работы под пожарными подразделениями понимаются группы разведки пожара в составе звеньев газодымозащитной службы (ГЗДС).

Тактические возможности групп разведки пожара зависят от многих факторов, которые приведены на рис. 1.

В настоящей работе предлагается использовать коротковолновые инфракрасные модули, модули ближней радиолокации в функциональных подсистемах автоматизированной системы пожаровзрывобезопасности для проведения мониторинга, предупреждения и ликвидации чрезвычайных ситуаций и пожаров [1–4]. Разработан программный комплекс мониторинга потенциально опасных объектов и система информационной поддержки принятия решений, реализующие процесс мониторинга пожара в здании с использованием инфракрасных технологий [5].

Целью исследования является оценка тактических возможностей групп разведки пожара при его



Рис. 1. Схема “факторы – тактические возможности”

Fig. 1. Scheme “factors – tactical capabilities”

мониторинге с использованием инфракрасных технологий, реализованных в виде программного комплекса и системы информационной поддержки принятия решений.

Для достижения поставленной цели необходимо модифицировать показатель тактических возможностей пожарных подразделений для его использования при оценке эффективности практического применения программного комплекса.

Теоретические положения исследования

По сравнению с камерами видимого диапазона инфракрасные технологии (на основе фотодиодных структур *арсенида индия – галлия*) обеспечивают качественную съемку в условиях дыма, тумана и запыленности, а также достаточную видимость при низкой освещенности [6–17].

В условиях пониженной (нулевой) видимости группы разведки пожара могут:

- своевременно обнаружить и спасти пострадавших, которые находятся под воздействием ОФП;
- своевременно обнаружить, локализовать и ликвидировать пожар.

Для исследования данного направления авторами предлагается использовать коротковолновые инфракрасные камеры:

- в системе мониторинга в здании (стационарные условия);
- в оборудовании пожарного для его информационной поддержки.

Для решения поставленной задачи проведена оценка тактических возможностей групп разведки пожара при мониторинге в здании с использованием инфракрасных технологий с учетом системы мониторинга и без ее учета.

Это особенно актуально при разведке на пожаре в процессе поиска пострадавших в здании звеньями ГДЗС, так как необходимо обследовать значительную площадь в условиях недостаточной видимости.

Схема дифференциации электромагнитного светового спектра представлена на рис. 2.

Коротковолновый инфракрасный диапазон (КИД) — это световое излучение электромагнитных волн длиной от 0,7 до 2,5 мкм. Сенсоры на основе *арсенида индия – галлия* являются сенсорами, которые используются при съемке в КИД-диапазоне. Коротковолновый инфракрасный диапазон близок к видимому, где фотоны либо отражаются, либо поглощаются объектами [18–20]. Это, в свою очередь, позволяет обеспечивать широкий динамический диапазон, который необходим для изображений с высоким разрешением. Технические средства на основе инфракрасных технологий [6–10] могут быть небольших размеров и потреблять мало энергии, но при этом выполнять требуемые функции.

На основе характеристик, присущих КИД, проведена оценка тактических возможностей групп разведки пожара при его мониторинге в здании [21].

Производительность U (м²/мин) групп разведки пожара в составе m звеньев ГДЗС в здании оценивается по формуле, приведенной в [22]:

$$U = V\{(m - 1)d + 2D\}, \quad (1)$$

где V — скорость движения звена ГДЗС, м/мин;

m — количество звеньев ГДЗС;

d — эффективное расстояние между звеньями, м;

D — условия видимости, м.

В практике решения задач информационного обеспечения пожарных подразделений, ведущих действия по тушению пожаров в зданиях, соотношение (1)



Рис. 2. Схема дифференциации электромагнитного светового спектра: БИД — ближний инфракрасный диапазон; КИД — коротковолновый инфракрасный диапазон; СИД — средневолновый инфракрасный диапазон; ДИД — длинноволновый инфракрасный диапазон

Fig. 2. Scheme of differentiation of electromagnetic light spectrum: NIR — near-infrared; SWIR — short-wavelength infrared; MWIR — mid-wavelength infrared; LWIR — long-wavelength infrared

используется для оценки производительности групп разведки в составе от 1 до 3 звеньев ГДЗС.

Применение коротковолновых инфракрасных технологий пожарными в составе звеньев ГДЗС позволит значительно улучшить условия видимости, что увеличит производительность групп разведки на пожаре.

Графически производительность звеньев ГДЗС при проведении разведки пожара в здании представим в виде прямоугольников, показанных на рис. 3.

Обследуемую зону поиска $S_{ГДЗС}$ (m^2) при проведении разведки пожара за время τ (мин) можно оценить по соотношению

$$S_{ГДЗС} = U\tau. \quad (2)$$

Показатель тактических возможностей групп разведки пожара K_t представляет собой отношение площади зоны поиска к общей площади поиска S :

$$K_t = S_{ГДЗС} / S. \quad (3)$$

Чем больше показатель K_t , тем выше тактические возможности при идентификации объектов поиска звеньями ГДЗС при пожаре в здании.

Однако при решении практических задач зачастую требуется нормализованное значение показателя тактических возможностей. Для этого используется понятие вероятности успеха поиска. Вероятность успеха P определяется по формуле, приведенной в [22]:

$$P = \frac{1}{1 - \exp(K_t)}. \quad (4)$$

Предполагается, что плотность распределения случайной величины при этом имеет экспоненциальный вид.

Приведем значение критерия P к общеизвестному виду нормализованного показателя тактических возможностей E . Для этого разложим $\exp(K_t)$ в ряд Тейлора. Используем следующую формулу для определения показателя тактических возможностей звена ГДЗС при проведении разведки:

$$E = K_t / (1 + K_t). \quad (5)$$

Применение соотношения (5) позволяет рассматривать эффективность применения средств мониторинга в каноническом виде:

$$1/E - 1/K - 1 = 0. \quad (6)$$

Первое слагаемое выражения (6) определяет отношение показателя эффективности групп разведки пожара к единице, т. е. к потенциально возможному значению эффективности применения средств мониторинга. Второе слагаемое выражения (6) характеризует степень эффективности действий групп разведки, оснащенных средствами мониторинга. Соотношение данных показателей обуславливает полную тактическую готовность звеньев разведки при

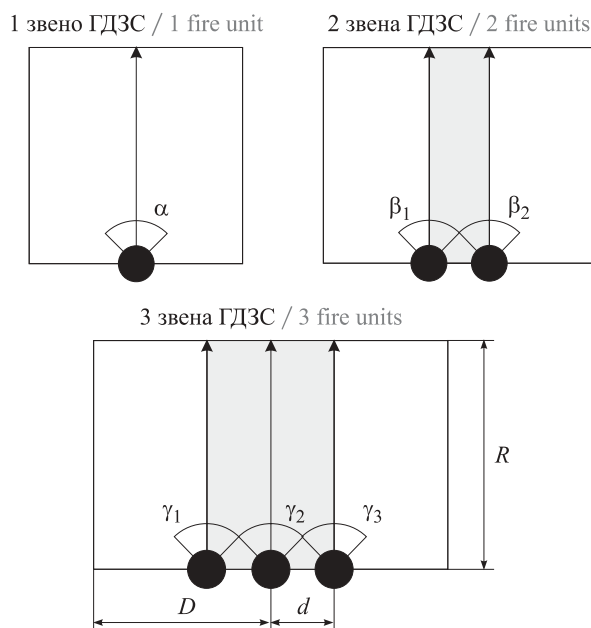


Рис. 3. Графическая интерпретация производительности групп разведки, состоящих из 1, 2 и 3 звеньев ГДЗС: R — расстояние, пройденное группами разведки пожара за время τ ; α , β_i , γ_i — углы обзора этих групп

Fig. 3. Graphic interpretation of the productivity of fire intelligence groups, consisting of 1, 2 and 3 fire units: R — covered distance by fire intelligence groups at the time τ ; α , β_i , γ_i — the groups viewing angle

реализации действий в здании, т. е. равно 1. Применение канонического вида оценки эффективности действий групп разведки, оснащенных средствами мониторинга, с использованием выражения (6) позволяет рассматривать каждый из показателей E и K в единой системе, а процедуры принятия решений по применению средств мониторинга дают возможность анализировать данные показатели в отдельности.

Результаты и их обсуждение

Приведем пример использования критерия для сравнения эффективности внедрения системы мониторинга с применением инфракрасных технологий. Исходные и расчетные параметры поиска группами разведки представлены в табл. 1 и 2, на рис. 4 и 5. (Данные без использования инфракрасных технологий взяты из [22, 23].)

Таблица 1. Исходные параметры поиска группами разведки
Table 1. The source data search options by intelligence groups

Показатель Index	Без системы мониторинга Without monitoring system	С системой мониторинга With monitoring system
V , м/мин / V , m/min	30	35
d , м / d , m	4	5
D , м / D , m	5	7

Таблица 2. Расчетные параметры поиска группами разведки
Table 2. The calculated parameters search options by intelligence groups

Расчетный параметр Calculated parameter	$N_{ГДЗС}$ N_{GDZS}	Без системы мониторинга Without monitoring system	С системой мониторинга With monitoring system
Производительность, m^2/min Productivity, m^2/min	1	300	490
	2	420	665
Площадь поиска*, m^2 The area of search*, m^2	1	3000	4900
	2	4200	6650

* Площадь поиска за время $\tau = 10$ мин.
The area of search during $\tau = 10$ minutes.

Из анализа рис. 4 и 5 следует, что применение инфракрасных технологий позволяет улучшить видимость для групп разведки пожара на 10–15 %.

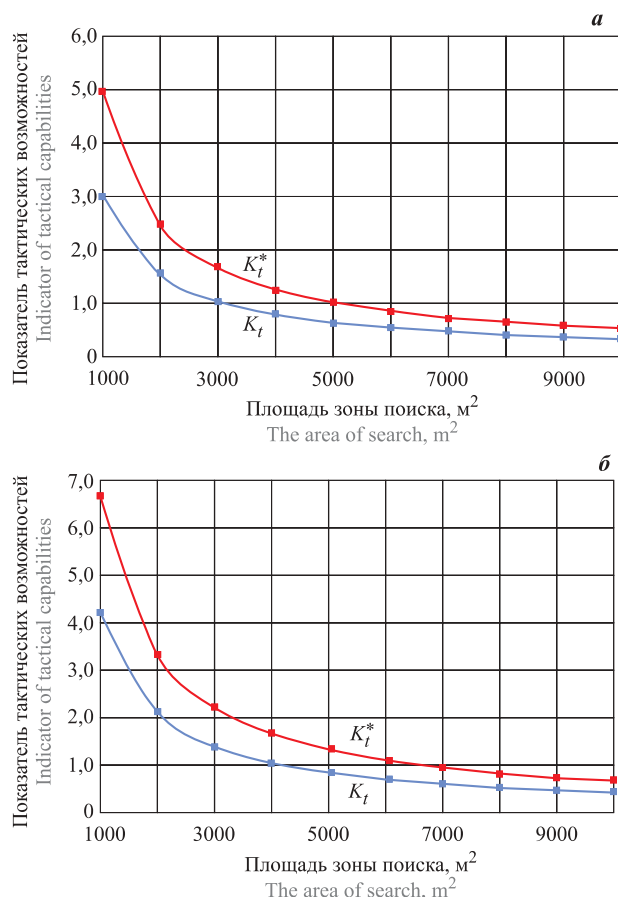


Рис. 4. Динамика показателя тактических возможностей для группы разведки, состоящей из одного (а) и двух (б) звеньев ГДЗС: K_t^* — показатель тактических возможностей групп разведки пожара с использованием инфракрасных технологий в системе мониторинга

Fig. 4. Dynamics of indicators of tactical capabilities for fire intelligence groups consisting of one (a) and two (b) fire units: K_t^* — indicators of tactical capabilities for fire intelligence groups using infrared technology in monitoring system

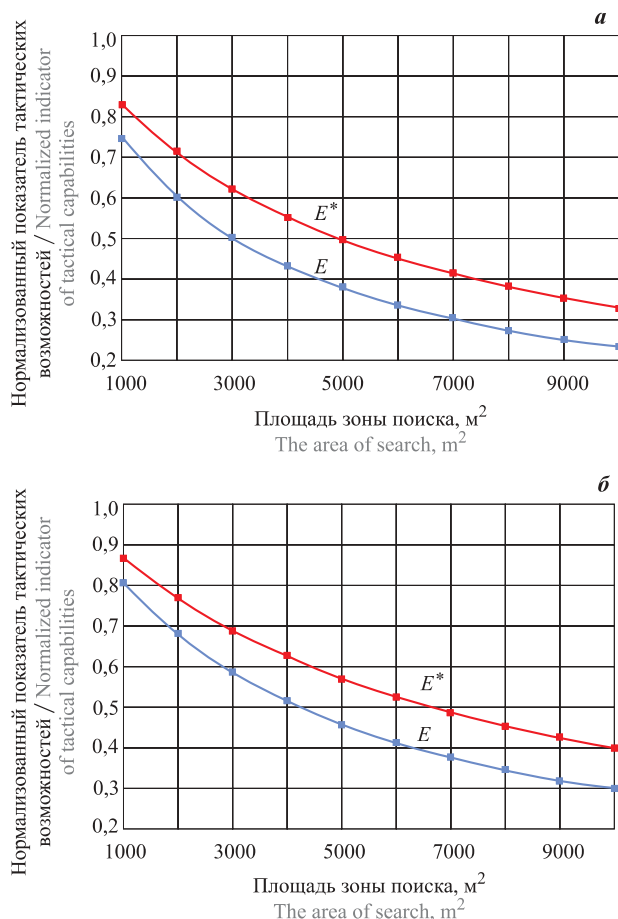


Рис. 5. Динамика нормализованного показателя тактических возможностей для группы разведки, состоящей из одного (а) и двух (б) звеньев ГДЗС: E^* — нормализованный показатель тактических возможностей групп разведки пожара с использованием инфракрасных технологий в системе мониторинга
Fig. 5. Dynamics of normalized indicators of tactical capabilities for fire intelligence groups consisting of one (a) and two (b) fire units: E^* — normalized indicator of tactical capabilities for fire intelligence groups using infrared technology in monitoring system

Использование предлагаемых инфракрасных технологий улучшает координацию действий группы разведки и ее пространственную ориентацию. Это позволяет обеспечить движение группы в здании по требуемому маршруту и тем самым сократить время на поиски пострадавших в задымленной зоне. Все это, в свою очередь, повышает тактические возможности групп разведки пожара в здании при его мониторинге и поиске пострадавших в сложных условиях плохой видимости.

Закключение

Применение средств мониторинга пожара группами разведки в составе звеньев ГДЗС на основе коротковолновых инфракрасных технологий в системе информационной поддержки принятия решений при разведке пожара в условиях проведения разведки пожара в здании, предусматривающих отсутст-

вие возможности использовать приборы видимого диапазона, осложнено или невозможно. Однако применение информационных технологий при ведении действий по тушению пожара должно быть обосновано с точки зрения повышения тактических возможностей пожарных подразделений. В настоящей работе рассмотрена специфика информационной поддержки управления групп разведки пожара на основе коротковолновых инфракрасных технологий.

Разработан показатель эффективности действий групп разведки, оснащенных средствами мониторинга, для которого в качестве теоретической основы выбран критерий тактических возможностей пожарных подразделений. Проведено функциональное исследование показателя с применением процедуры разложения компонентов показателя в ряд Тейлора для его приведения к каноническому виду, удобному для покомпонентного анализа эффективности применения средств мониторинга в здании при проведении разведки на пожаре. Предложено выражение показателя эффективности в виде отдельных соотношений слагаемых, характеризующих степень достижения целей каждой из компонент системы мониторинга. Это позволило при оценке эф-

фективности групп разведки, оснащенных средствами мониторинга, рассматривать каждый из показателей в отдельности.

Проведено исследование эффективности средств мониторинга на основе коротковолновых инфракрасных технологий в системе информационной поддержки принятия решений. На модельном примере показано, что система позволит улучшить видимость для звеньев газодымозащитной службы на 10–15 %, а также улучшить координацию действий, пространственную ориентацию звеньев ГДЗС в непригодной для дыхания среде. Сохранение пространственной ориентации звеньями ГДЗС в условиях сниженной (нулевой) видимости позволяет осуществлять движение по требуемому маршруту следования внутри здания.

Применение средств мониторинга на основе коротковолновых инфракрасных технологий в системе информационной поддержки принятия решений даст возможность повысить тактические возможности групп разведки пожара в здании, что в свою очередь повысит оперативность принятия управленческих решений при поиске, обнаружении и спасении пострадавших в непригодной для дыхания среде.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Топольский Н. Г. Основы автоматизированных систем пожаровзрывобезопасности объектов. — М. : МИПБ МВД России, 1997. — 164 с.
2. Топольский Н. Г., Мокшанцев А. В., Михайлов К. А. Коротковолновые инфракрасные технологии автоматизированных систем мониторинга, предупреждения и ликвидации ЧС и пожаров // Системы безопасности-2016 : матер. 25-й Международн. науч.-техн. конф. — М. : Академия ГПС МЧС России, 2016. — С. 606–610.
3. Симаков В. В., Тетерин И. М., Топольский Н. Г., Зеркаль А. Д., Мокшанцев А. В., Нгуен Тханг Куанг. О применении модуля ближней радиолокации в автоматизированных системах предупреждения и ликвидации чрезвычайных ситуаций // Технологии техносферной безопасности. — 2012. — № 2(42). — 8 с. URL: <http://agps-2006.narod.ru/ttb/2012-2/11-02-12.ttb.pdf> (дата обращения: 25.02.2019).
4. Топольский Н. Г., Тараканов Д. В., Михайлов К. А., Мокшанцев А. В. Использование инфракрасных технологий при разведке пожара звеньями газодымозащитной службы // Системы безопасности-2016 : матер. 25-й Международн. науч.-техн. конф. — М. : Академия ГПС МЧС России, 2016. — С. 611–613.
5. Свидетельство о регистрации программы для ЭВМ 2019612615. Программный комплекс мониторинга потенциально опасных объектов с использованием инфракрасных технологий / Мокшанцев А. В., Топольский Н. Г., Михайлов К. А. — № 2019611426; заявл. 06.02.2019; опублик. 22.02.2019.
6. Бурлаков И. Д., Гринченко Л. Я., Дирочка А. И., Залетаев Н. Б. Детекторы коротковолнового ИК-диапазона на основе InGaAs (обзор) // Успехи прикладной физики. — 2014. — Т. 2, № 2. — С. 131–162.
7. Hansen M. P., Malchow D. S. Overview of SWIR detectors, cameras, and applications // Thermosense XXX: Proceedings of SPIE Defense and Security Symposium / Vavilov V. P., Burleigh D. D. (eds). — 2008. — Vol. 6939. — P. 69390I–1–69390I-11. DOI: 10.1117/12.777776.
8. Rogalski A. Infrared Detectors. — 2nd ed. — Boca Raton : CRC Press, 2010. — 898 p. DOI: 10.1201/b10319.
9. Андреев Д. С., Болтарь К. О., Бурлаков И. Д., Залетаев Н. Б., Кравченко Н. В., Лопухин А. А., Трошков А. Е., Филачев А. М., Чинарёва И. В. Матричное фотоприемное устройство формата 320×256 для спектрального диапазона 0,9–1,7 мкм на основе эпитаксиальной фотодиодной гетероструктуры InGaAs/InP // 22-я Международная научно-техническая конференция по фотоэлектронике и приборам ночного видения : сб. тр. — М. : НПО “Орион”, 2012. — С. 138–139.

10. Залетаев Н. Б., Чинарёва И. В., Кузнецов П. А., Кравченко Н. В., Климанов Е. А., Трошков А. Е., Зайцев А. А., Кузнецов А. В. Матричное фотоприемное устройство на основе InGaAs/InP для ближнего ИК-диапазона // 21-я Международная научно-техническая конференция по фотоэлектронике и приборам ночного видения : тезисы докл. — М. : НПО “Орион”, 2010. — С. 112.
11. Wu X., Gu Y., Yan F., Choa F. S., Shu P. High uniformity, stability, and reliability large-format InGaAs APD arrays // Proceedings of Conference on Lasers and Electro-Optics (CLEO). — Baltimore, Maryland : IEEE, 2007, p. CMII2. DOI: 10.1109/cleo.2007.4452558.
12. Фомин Ф. В. Современное состояние и перспективы развития зарубежных ИК-систем / Под ред. Н. Н. Вилковой. — М. : МНИТИ, 2018. — 35 с.
13. Суриков А. В., Лешенюк Н. С. Система визуализации объекта при пониженной прозрачности окружающей среды и повышенных температурах // Проблемы обеспечения безопасности при ликвидации последствий чрезвычайных ситуаций. — 2015. — Т. 1. — С. 441–444.
14. Суриков А. В., Петухов В. О., Горобец В. А. Основные методы и устройства, применяемые и перспективные для улучшения видимости при чрезвычайных ситуациях // Чрезвычайные ситуации: предупреждение и ликвидация. — 2011. — № 1(29). — С. 121–129.
15. Суриков А. В., Лешенюк Н. С., Кунцевич Б. Ф., Горобец В. В. Оптико-электронная система для улучшения видимости при задымлении // Вестник Командно-инженерного института МЧС Республики Беларусь. — 2014. — № 2(20). — С. 4–12.
16. Bernstein L. S., Adler-Golden S. M., Sundberg R. L., Ratkowski A. J. In-scene-based atmospheric correction of uncalibrated VISible-SWIR (VIS-SWIR) hyper- and multi-spectral imagery // Proceedings of SPIE. Remote Sensing of Clouds and the Atmosphere XIII. — 2008. — Vol. 7101. — P. 6–7. DOI: 10.1117/12.808193.
17. Cowlard A., Jahn W., Abecassis-Empis C., Rein G., Torero J. L. Sensor assisted fire fighting // Fire Technology. — 2010. — Vol. 46, No. 3. — P. 719–741. DOI: 10.1007/s10694-008-0069-1.
18. Hines G. D., Rahman Z., Jobson D. J., Woodell G. A., Harrah S. D. Real-time enhanced vision system // Proceedings of SPIE. Enhanced and Synthetic Vision. — 2005. — Vol. 5802. — P. 127–132. DOI: 10.1117/12.603656.
19. Chen C. C. Attenuation of electromagnetic radiation by haze, fog, clouds and rain : Report R-1694-PR. — Santa Monica : Rand Corp., 1975. — 41 p. URL: <http://www.rand.org/content/dam/rand/pubs/reports/2006/R1694.pdf> (дата обращения: 07.02.2019).
20. Beier K. R., Boehl R., Fries J., Hahn W., Hausamann D., Tank V., Wagner G., Weisser H. Measurement and modeling of infrared imaging systems at conditions of reduced visibility (fog) for traffic applications // Proceedings of SPIE. Characterization and Propagation of Sources and Backgrounds. — 1994. — Vol. 2223. — P. 175–186. DOI: 10.1117/12.177911.
21. Тараканов Д. В., Баканов М. О., Семенов А. О. Методика оценки эффективности мониторинга состояния пожаров в зданиях // Технологии техносферной безопасности. — 2017. — № 3(73). — С. 97–102. URL: <http://agps-2006.narod.ru/ttb/2017-3/32-03-17.ttb.pdf> (дата обращения: 22.02.2019).
22. Терещев В. В., Артемьев Н. С., Корольченко Д. А., Подгрушный А. В., Фомин В. И., Грачев В. А. Промышленные здания и сооружения. Серия “Противопожарная защита и тушение пожаров”. — Кн. 2. — М. : Пожнаука, 2006. — 412 с.
23. Грачев В. А., Поповский Д. В. Газодымозащитная служба : учебник / Под общ. ред. Е. А. Мешалкина. — М. : Пожжнуга, 2004. — 384 с.

REFERENCES

1. N. G. Topolskiy. *Osnovy avtomatizirovannykh sistem pozharovzryvbezopasnosti obyektov* [Basics of computer-aided fire and explosion safety systems]. Moscow, Fire Safety Institute of the Ministry of Internal Affairs of Russia Publ., 1997. 164 p. (in Russian).
2. N. G. Topolskiy, A. V. Mokshantsev, K. A. Mikhaylov. Short-wave infrared technology automated monitoring systems, of prevention and liquidation of emergency situations and fires. In: *Sistemy bezopasnosti-2016* [Safety Systems-2016]. Proceedings of the 25th International Scientific-Technical Conference. Moscow, State Fire Academy of Emercom of Russia Publ., 2016, pp. 606–610 (in Russian).
3. V. V. Simakov, I. M. Teterin, N. G. Topolskiy, A. D. Zerkal, A. V. Mokshantsev, Nguyen Thang Quang. About use of the module of the near radar-location in the automated systems of the prevention and elimination of emergency situations. *Tekhnologii tekhnosfernoy bezopasnosti / Technology of Technosphere Safety*, 2012, issue 2(42). 8 p. (in Russian). Available at: <http://agps-2006.narod.ru/ttb/2012-2/11-02-12.ttb.pdf> (Accessed 25 February 2019).

4. N. G. Topolskiy, D. V. Tarakanov, A. V. Mokshantsev, K. A. Mikhaylov. Infrared technologies use in the exploration of fire by the fire links. In: *Sistemy bezopasnosti–2016* [Safety Systems–2016]. Proceedings of the 25th International Scientific-Technical Conference. Moscow, State Fire Academy of Emercom of Russia Publ., 2016, pp. 611–613 (in Russian).
5. A. V. Mokshantsev, N. G. Topolskiy, K. A. Mikhaylov. *Software complex for monitoring potentially hazardous objects using infrared technologies*. Computer Program RU, no. 2019612615, publ. date 22.02.2019 (in Russian).
6. I. D. Burlakov, L. Ya. Grinchenko, A. I. Dirochka, N. B. Zaletaev. Short wavelength infrared InGaAs detectors. *Uspekhi prikladnoi fiziki / Advances in Applied Physics*, 2014, vol. 2, no. 2, pp. 131–162 (in Russian).
7. M. P. Hansen, D. S. Malchow. Overview of SWIR detectors, cameras, and applications. In: V. P. Vavilov, D. D. Burleigh (eds). *Thermosense XXX*. Proceedings of SPIE Defense and Security Symposium, 2008, vol. 6939, pp. 69390I-1–69390I-11. DOI: 10.1117/12.777776.
8. A. Rogalski. *Infrared Detectors*. 2nd ed. Boca Raton, CRC Press, 2010. 898 p. DOI: 10.1201/b10319.
9. D. S. Andreev, K. O. Boltar, I. D. Burlakov, N. B. Zaletaev, N. V. Kravchenko, A. A. Lopukhin, A. E. Troshkov, A. M. Filachev, I. V. Chinareva. In: *Proceedings of XXII International Scientific and Technical Conference on Photoelectronics and Night Vision Devices*. Moscow, SPA “Orion” Publ., 2012, pp. 138–139 (in Russian).
10. N. B. Zaletaev, I. V. Chinareva, P. A. Kuznetsov, N. V. Kravchenko, E. A. Klimanov, A. E. Troshkov, A. A. Zaytsev, A. V. Kuznetsov. In: *Abstracts of the XXI International Scientific and Technical Conference on Photoelectronics and Night Vision Devices*. Moscow, SPA “Orion” Publ., 2010, p. 112 (in Russian).
11. X. Wu, Y. Gu, F. Yan, F. S. Choa, P. Shu. High uniformity, stability, and reliability large-format InGaAs APD arrays. In: *Proceedings of Conference on Lasers and Electro-Optics (CLEO)*. Baltimore, Maryland, IEEE, 2007, p. CMI2. DOI: 10.1109/cleo.2007.4452558.
12. F. V. Fomin. *Sovremennoye sostoyaniye i perspektivy razvitiya zarubezhnykh IK-sistem* [Current state and prospects of development of foreign IR systems.] Ed. by N. N. Vilkova. Moscow, MNITI Publ., 2018. 35 p. (in Russian).
13. A. V. Surikov, N. S. Leshenyuk. The imaging system of the object at a low transparency environment and elevated temperatures. *Problemy obespecheniya bezopasnosti pri likvidatsii posledstviy chrezvychaynykh situatsiy / Problems of Safety in Emergency Situations*, 2015, vol. 1, pp. 441–444 (in Russian).
14. A. V. Surikov, V. O. Petuhov, V. A. Gorobets. Current and prospective basic methods and devices to improve visibility in emergency situations. *Chrezvychaynyye situatsii: preduprezhdeniye i likvidatsiya / Emergency Situations: Prevention and Response*, 2011, no. 1(29), pp. 121–129 (in Russian).
15. A. V. Surikov, N. S. Leshenyuk, B. F. Kunceovich, V. V. Gorobec. Optoelectronic system to increase visibility in a smoky environment. *Vestnik Komandno-inzhenernogo instituta MChS Respubliki Belarus' / Vestnik of Command-Engineering Institute MES Belarus*, 2014, no. 2(20), pp. 4–12 (in Russian).
16. L. S. Bernstein, S. M. Adler-Golden, R. L. Sundberg, A. J. Ratkowski. In-scene-based atmospheric correction of uncalibrated VISible-SWIR (VIS-SWIR) hyper- and multi-spectral imagery. In: *Proceedings of SPIE. Remote Sensing of Clouds and the Atmosphere XIII*, 2008, vol. 7101, pp. 6–7. DOI: 10.1117/12.808193.
17. A. Cowlard, W. Jahn, C. Abecassis-Empis, G. Rein, J. L. Torero. Sensor assisted fire fighting. *Fire Technology*, 2010, vol. 46, no. 3, pp. 719–741. DOI: 10.1007/s10694-008-0069-1.
18. G. D. Hines, Z. Rahman, D. J. Jobson, G. A. Woodell, S. D. Harrah. Real-time enhanced vision system. In: *Proceedings of SPIE. Enhanced and Synthetic Vision*, 2005, vol. 5802, pp. 127–132. DOI: 10.1117/12.603656.
19. C. C. Chen. *Attenuation of electromagnetic radiation by haze, fog, clouds and rain*. Report R-1694-PR. Santa Monica, Rand Corp., 1975. 41 p. Available at: <http://www.rand.org/content/dam/rand/pubs/reports/2006/R1694.pdf> (Accessed 7 February 2019).
20. K. R. Beier, R. Boehl, J. Fries, W. Hahn, D. Hausmann, V. Tank, G. Wagner, H. Weisser. Measurement and modeling of infrared imaging systems at conditions of reduced visibility (fog) for traffic applications. In: *Proceedings of SPIE. Characterization and Propagation of Sources and Backgrounds*, 1994, vol. 2223, pp. 175–186. DOI: 10.1117/12.177911.
21. D. V. Tarakanov, M. O. Bakanov, A. O. Semenov. Method for assessing effectiveness of monitoring state of fires in buildings. *Tekhnologii tekhnosfernoy bezopasnosti / Technology of Technosphere Safety*, 2017, no. 3(73), pp. 97–102 (in Russian). Available at: <http://agps-2006.narod.ru/ttb/2017-3/32-03-17.ttb.pdf> (Accessed 22 February 2019).

22. V. V. Terebnev, N. S. Artemyev, D. A. Korolchenko, A. V. Podgrushnyy, V. I. Fomin, V. A. Grachev. *Promyshlennyye zdaniya i sooruzheniya. Seriya: Protivopozharnaya zashchita i tusheniye pozharov* [Industrial buildings and structures. Series: Fire protection and firefighting]. Book 2. Moscow, Pozhnauka Publ., 2006. 412 p. (in Russian).
23. V. A. Grachev, D. V. Popovskiy. *Gazodymozashchitnaya sluzhba* [Gas and smoke protection service]. General ed. by E. A. Meshalkin. Moscow, Pozhnkiga Publ., 2004. 384 p. (in Russian).

Поступила 28.02.2019; после доработки 29.03.2019; принята к публикации 03.04.2019
Received 28 February 2019; received in revised form 29 March 2019; accepted 3 April 2019

Информация об авторах

ТОПОЛЬСКИЙ Николай Григорьевич, д-р техн. наук, профессор, заслуженный деятель науки РФ, профессор кафедры информационных технологий, Академия ГПС МЧС России, г. Москва, Российская Федерация; ORCID: 0000-0002-0921-4764, Scopus Author ID: 6602393869, e-mail: ntopolskii@mail.ru

ТАРАКАНОВ Денис Вячеславович, канд. техн. наук, старший преподаватель кафедры пожарной тактики и основ аварийно-спасательных и других неотложных работ в составе УНК "Пожаротушение", Ивановская пожарно-спасательная академия ГПС МЧС России, г. Иваново, Российская Федерация; ORCID: 0000-0002-5811-7397, e-mail: den-pgsm@mail.ru

МИХАЙЛОВ Кирилл Андреевич, адъюнкт факультета подготовки научно-педагогических кадров, кафедра информационных технологий, Академия ГПС МЧС России, г. Москва, Российская Федерация; ORCID: 0000-0002-6420-0074, e-mail: mihkir.94@mail.ru

МОКШАНЦЕВ Александр Владимирович, канд. техн. наук, заместитель начальника кафедры информационных технологий, Академия ГПС МЧС России, г. Москва, Российская Федерация; ORCID: 0000-0002-2396-094X, e-mail: mok-av@yandex.ru

Information about the authors

Nikolay G. TOPOLSKIY, Dr. Sci. (Eng.), Professor, Honoured Science Worker of Russian Federation, Professor of Department of Information Technology, State Fire Academy of Emercom of Russia, Moscow, Russian Federation; ORCID: 0000-0002-0921-4764, Scopus Author ID: 6602393869, e-mail: ntopolskii@mail.ru

Denis V. TARAKANOV, Cand. Sci. (Eng.), Senior Lecturer of Fire Tactics and Bases of Emergency Rescue and Other Urgent Works Department within the Academic and Research Complex (ARC) "Fire Extinguishing", Ivanovo Fire and Rescue Academy of State Firefighting Service of Emercom of Russia, Ivanovo, Russian Federation; ORCID: 0000-0002-5811-7397, e-mail: den-pgsm@mail.ru

Kirill A. MIKHAYLOV, Adjunct of Faculty of Scientific and Pedagogical Staff, Department of Information Technology, State Fire Academy of Emercom of Russia, Moscow, Russian Federation; ORCID: 0000-0002-6420-0074, e-mail: mihkir.94@mail.ru

Aleksandr V. MOKSHANTSEV, Cand. Sci. (Eng.), Deputy Chief of Department of Information Technology, State Fire Academy of Emercom of Russia, Moscow, Russian Federation; ORCID: 0000-0002-2396-094X, e-mail: mok-av@yandex.ru

УДК 696.1

Частные вопросы по проектированию внутреннего противопожарного водопровода

© **А. М. Мешман**¹

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

АННОТАЦИЯ

Рекомендовано количество пожарных кранов, одновременно используемых при тушении пожара, а также минимальный расход воды на пожаротушение определять согласно таблице, в которой представлены все виды зданий, сооружений и помещений в соответствии с их функциональным назначением (Ф1–Ф4).

Ключевые слова: виды зданий, сооружений и помещений; функциональное назначение; пожарный кран; пожаротушение; минимальный расход воды; высота помещения.

Для цитирования: Мешман А. М. Частные вопросы по проектированию внутреннего противопожарного водопровода // Пожаровзрывобезопасность/Fire and Explosion Safety. — 2019. — Т. 28, № 3. — С. 98–100.

Special issues on design installation of standpipe and hose systems

© **Leonid M. Meshman**¹

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

ABSTRACT

It is recommended to determine the number of fire hydrants (FG) simultaneously used in the fire extinguishing, as well as the minimum water consumption for firefighting according to the table, which presents all types of buildings, structures and premises in accordance with their functional purpose according to F1–F4.

Keywords: types of buildings, structures and premises; functional purpose; fire hydrants; fire extinguishing; minimum water consumption, room height.

For citation: L. M. Meshman. Special issues on design installation of standpipe and hose systems. *Pozharovzryvobezopasnost/Fire and Explosion Safety*, 2019, vol. 28, no. 3, pp. 98–100 (in Russian).



ВОПРОС 1

В табл. 1 СП 10.13130.2009 “Системы противопожарной защиты. Внутренний противопожарный водопровод (ВПВ). Требования пожарной безопасности” (с изм. № 1) (далее СП 10) приведены сведения о числе пожарных стволов и минимальном расходе воды на внутреннее пожаротушение на одну струю в зависимости от этажности, объема или площади жилых, общественных, административно-бытовых зданий и помещений.

При прохождении экспертизы по проектам ВПВ часто возникают постоянные разногласия, так как Госэкспертиза ссылается на ст. 32 Федерального закона “Технический регламент о требованиях пожарной безопасности” от 22.07.2008 № 123-ФЗ, которая требует, чтобы здания, сооружения, пожарные отсеки, помещения в зависимости от их назначения подразделялись по классам функциональной пожарной опасности.

Однако в табл. 1 СП 10 приводятся не все типы зданий, а всего пять:

- 1) жилые здания — Ф1.3;
- 2) здания управлений — Ф4.3;

3) клубы с эстрадой, театры, кинотеатры, актовые и конференц-залы, оборудованные киноаппаратурой, — Ф2.1;

4) общежития и общественные здания, не указанные в поз. 2, — Ф1.2;

5) административно-бытовые здания промышленных предприятий — Ф4.3.

В то же время в табл. 1 СП 10, например, отсутствуют:

- музеи, выставки, танцевальные залы и другие подобные учреждения в закрытых помещениях — Ф2.2;
- здания организаций общественного питания — Ф3.2;
- вокзалы — Ф3.3;
- поликлиники и амбулатории — Ф3.4;
- физкультурно-оздоровительные комплексы и спортивно-тренировочные учреждения с помещениями без трибун для зрителей — Ф3.6;
- объекты религиозного назначения — Ф3.7;
- здания образовательных организаций высшего образования, организаций дополнительного профессионального образования — Ф4.2.

ОТВЕТ

В настоящее время специалисты ФГБУ «Всероссийский научно-исследовательский институт противопожарной обороны МЧС России» рекомендуют для зданий функционального назначения Ф1–Ф4 количество пожарных кранов (ПК), одновременно используемых при тушении пожара, а также минималь-

ный расход воды на пожаротушение определять в соответствии с нижеприведенной таблицей.

Общий расход ВПВ должен рассчитываться по количеству ПК, одновременно используемых при тушении пожара, с учетом потерь давления между диктующим и последующими, одновременно используемыми при тушении пожаров ПК.

Количество ПК, одновременно используемых для тушения пожара, и минимальный расход диктующего ПК для зданий Ф1–Ф4

№ п/п	Жилые, общественные и административные здания	Количество ПК для расчета расхода	Минимальный расход диктующего ПК, л/с
1	Многоквартирные жилые дома* (Ф1.3), общежития и гостиницы квартирного типа, в том числе с апартаментами, размещаемые в жилых зданиях (Ф1.2):		
	при количестве этажей от 12 до 16 включ. (или при высоте здания от 30 до 50 м включ.) и при общей длине коридора до 10 м включ.	1	2,5
	то же, при общей длине коридора св. 10 м	2	2,5
	при количестве этажей св. 16 до 25 включ. (или при высоте здания св. 50 до 75 м включ.)* и при общей длине коридора до 10 м включ.	2	2,5
	то же, при общей длине коридора св. 10 м	3	2,5
2	Здания коридорного и некоридорного типа: административных общественных организаций, бытового и коммунального обслуживания (Ф3.5); административно-бытовых промышленных предприятий, органов управления, учреждений, проектно-конструкторских организаций, информационных, редакционно-издательских организаций и научных организаций, банков, контор, офисов (Ф4.3); гостиниц (Ф1.2); поликлиник (Ф3.4); физкультурно-оздоровительные комплексы и спортивно-тренировочные учреждения (Ф3.6); здания образовательных учреждений высшего профессионального образования (Ф4.2)**:		
	при количестве этажей от 6 до 10 включ. (или при высоте здания от 18 до 30 м включ.) общей площадью до 8 тыс. м ² включ. (общим объемом до 25 тыс. м ³ включ.)	1	2,5
	то же, общей площадью св. 8 тыс. м ² (общим объемом св. 25 тыс. м ³)	2	2,5
	при количестве этажей св. 10 до 16 включ. (или при высоте здания св. 30 до 50 м включ.) общей площадью св. 8 тыс. м ² (общим объемом св. 25 тыс. м ³)	3	2,5
3	Здания детских дошкольных учреждений, специализированных домов престарелых и инвалидов (неквартирные); больницы; спальные корпуса образовательных учреждений интернатного типа и детских учреждений (Ф1.1) независимо от объема**:		
	при количестве этажей до 2 включ. (или при высоте здания до 8 м включ.)	1	2,5
	при количестве этажей св. 2 до 10 (или при высоте здания св. 8 до 30 м включ.)	2	2,5
	при количестве этажей св. 10 (или при высоте здания св. 30 м)	3	2,5
4	Здания театров, кинотеатров, концертных залов, клубов, цирков и других подобных учреждений с расчетным количеством посадочных мест для посетителей в закрытых помещениях (Ф2.1):		
	при вместимости зрительного зала до 300 мест включ. и при площади сцены до 100 м ² включ.	1	2,5
	то же, при вместимости зрительного зала более 300 мест	2	5
	при вместимости зрительного зала более 300 мест и при площади сцены до 500 м ² включ.	3	5
	то же, при площади сцены более 500 м ²	4	5
5	Здания библиотек и архивов (Ф2.1), спортивных сооружений (Ф2.1, Ф3.6) и других подобных учреждений с расчетным количеством посадочных мест для посетителей в закрытых помещениях высотой до 50 м включ.:		
	при общей площади св. 0,5 до 2,5 тыс. м ² включ.	2	2,5
	при общей площади св. 2,5 тыс. м ²	3	2,5

Окончание таблицы

№ п/п	Жилые, общественные и административные здания	Количество ПК для расчета расхода	Минимальный расход диктующего ПК, л/с
6	Здания музеев, выставочных залов, танцевальных залов и других подобных учреждений в закрытых помещениях (Ф2.2), здания организаций торговли (Ф3.1)**:		
	при количестве этажей до 2 включ. (или при высоте здания до 8 м включ.) общей площадью до 2,5 тыс. м ² включ. (общим объемом 7,5 тыс. м ³ включ.)	1	2,5
	то же, при количестве этажей до 6 включ. (или при высоте здания до 20 м включ.) общей площадью до 2,5 тыс. м ² включ. (общим объемом до 7,5 тыс. м ³ включ.)	2	2,5
7	Здания общежитий коридорного типа (Ф1.2)**:		
	при количестве этажей от 3 до 10 включ. (или при высоте здания от 9 до 30 м включ.) общей площадью от 1,7 до 8,0 тыс. м ² включ. (общим объемом от 5 до 25 тыс. м ³ включ.)	1	2,5
	при числе этажей св. 10 до 16 включ. (или при высоте здания св. 30 до 50 м включ.) общей площадью до 8,0 тыс. м ² включ. (общим объемом до 25 тыс. м ³ включ.)	2	2,5
	то же, общей площадью св. 8,0 тыс. м ² (общим объемом св. 25 тыс. м ³)	3	2,5

* В том числе жилых помещений, входящих в состав зданий с помещениями другого функционального назначения.

** Принимается при любом из событий или совокупности двух событий, при этом определяющим является высота здания.

Примечания:

1. На каждой рабочей галерее и колосниках сцены должно размещаться не менее двух ПК-с, по одному с правой и левой сторон сцены; установка ПК-с допускается открыто без пожарных шкафов.
2. Расход воды и количество ПК-с для жилых зданий Ф1.3, общественных, административных и административно-бытовых зданий функциональной пожарной опасности Ф3.1, Ф3.2, Ф3.4–Ф3.6, Ф4.2, Ф4.3 (или пожарных отсеков) высотой св. 50 м и общей площадью до 17 тыс. м² включ. (или объемом 50 тыс. м³ включ.)** следует принимать из расчета тушения пожара четырьмя ПК-с при расходе воды диктующего ПК-с не менее 2,5 л/с; если общая площадь (или объем)** здания больше, то четырьмя ПК-с при расходе воды диктующего ПК-с не менее 5 л/с.
3. В помещениях залов с массовым пребыванием людей при наличии сгораемой отделки количество ПК следует принимать на один больше, чем указано в таблице.

Материал поступил в редакцию 12.05.2019
Received 12 May 2019

Информация об авторе

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

Information about the author

Leonid M. MESHMAN, Cand. Sci. (Eng.), Leading Researcher, All-Russian Research Institute for Fire Protection of Emercom of Russia, Balashikha, Moscow Region, Russian Federation

ПРАВИЛА ДЛЯ АВТОРОВ!

Направляемые в журнал “ПОЖАРОВЗРЫВБЕЗОПАСНОСТЬ/FIRE AND EXPLOSION SAFETY” статьи должны содержать результаты научных исследований и испытаний, описания новых технических устройств и программно-информационных продуктов; обзоры, комментарии к нормативно-техническим документам, справочные материалы и т. п. Авторы должны указать, к какому типу относится их статья:

- научно-теоретическая;
- научно-эмпирическая;
- аналитическая (обзорная);
- дискуссионная;
- рекламная.

Не допускается направлять в редакцию работы, которые были опубликованы и/или приняты к печати в других изданиях.

Редакция просит авторов при подготовке рукописи руководствоваться изложенными ниже правилами.

1. Статья и сопутствующие ей материалы должны быть направлены в редакцию в электронном виде по адресу info@fire-smi.ru.

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

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

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

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

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

Материал статьи должен излагаться в следующем порядке.

2.1. Номер УДК (универсальная десятичная классификация).

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

2.3. Информация об авторах.

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

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

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

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

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

2.3.3. ORCID, Researcher ID, Scopus Author ID.

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

Сокращения и условные обозначения физических величин в тексте статьи должны соответствовать действующим международным стандартам. Формулы и буквенные обозначения должны быть четкими и ясными. Все буквенные обозначения, входящие в формулы, должны быть расшифрованы с указанием единиц измерения. Размерность всех характеристик должна соответствовать системе СИ.

Иллюстрации в электронной версии прилагаются отдельно. Фотографии должны быть сделаны с хорошего негатива контрастной печатью (файлы растровых изображений предоставляются с разрешением не менее 300 dpi, черно-белая штриховая графика — 600 dpi). Файлы векторной графики следует предоставлять в формате той программы, в которой они созданы, либо печатать PDF-файл из этой программы. Все иллюстрации должны иметь сквозную нумерацию. Чертежи и карты в качестве иллюстраций неприемлемы. Ссылки на все рисунки в тексте обязательны.

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

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

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

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

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

В описании источников необходимо указывать всех авторов.

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

Список литературы должен содержать не менее 20 источников (в это число не входят нормативные документы, патенты, ссылки на сайты компаний и т. п.). При этом количество ссылок на статьи из иностранных научных журналов и другие иностранные источники должно быть не менее 40 % от общего количества ссылок. Не более половины от оставшихся 60 % должны составлять статьи из русскоязычных научных журналов, остальное — другие первоисточники на русском языке.

Не менее половины источников должно быть включено в один из ведущих индексов цитирования: Российский индекс научного цитирования eLibrary, Web of Science, Scopus, Chemical Abstracts, MathSciNet, Springer и др. В случае присвоения публикациям цифрового идентификатора объекта (DOI) его необходимо указать, что позволит однозначно идентифицировать объект в базах данных.

Состав источников должен быть актуальным и содержать не менее половины современных (не старше 10 лет) статей из научных журналов или других публикаций.

В списке литературы должно быть не более 30 % источников, автором либо соавтором которых является автор статьи.

Следует обратить внимание на публикации диссертаций (особенно докторских), защищенных в последние годы по ближайшей научной специальности или группе специальностей. Для поиска рекомендуется использовать ресурс <http://www.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!

Леонид Мунеевич МЕШМАН

09.12.1939–30.05.2019



С прискорбием сообщаем, что 30 мая 2019 г. на 80-м году жизни после продолжительной болезни скончался известный российский ученый, кандидат технических наук, ведущий научный сотрудник ВНИИПО МЧС России **Леонид Мунеевич МЕШМАН**.

Леонид Мунеевич родился 9 декабря 1939 г. в г. Москве.

В 1958 г. окончил Московский электромеханический техникум. С 1959 г. по 1962 г. проходил службу в рядах Советской армии.

В 1962 г. Мешман Л. М. поступил на работу в ЦНИИПО МВД СССР, и с этого момента вся его жизнь была связана с наукой. За время своей деятельности в институте он прошел путь от старшего лаборанта до заместителя начальника отдела. Вся трудовая деятельность Леонида Мунеевича была посвящена разработке различных систем пожарной автоматики и робототехники. По результатам научных работ он защитил кандидатскую диссертацию.

За участие в ликвидации катастрофы на ЧАЭС Мешман Л. М. получил медаль МЧС “За отличие в ликвидации последствий чрезвычайной ситуации”.

За многолетний добросовестный труд Леонид Мунеевич награжден медалями “За доблестный труд”, “За безупречную службу” I, II и III степеней, а также имеет множество благодарностей от руководства института и МЧС России. Одна из его работ отмечена Золотой медалью ВДНХ.

Мешман Л. М. является автором четырех монографий, множества статей в научных журналах, авторских свидетельств и патентов на изобретения. Не раз Леонид Мунеевич публиковал результаты своих научных работ и в журнале “Пожаровзрывобезопасность”, размещал свои комментарии в рубрике “Вопрос–Ответ”. По просьбе редакции Леонид Мунеевич часто выступал в качестве строгого, но справедливого рецензента статей, поступающих в наш журнал.

Получили известность лекции Леонида Мунеевича, которые он читал по приглашению в различных вузах и НИИ. Они отличались не только богатым содержанием, но и живой формой изложения и неизменно привлекали не только студентов, аспирантов и научных сотрудников, но и практиков.

Л. М. Мешман обладал уникальной трудоспособностью, неиссякаемым оптимизмом, талантом объединять вокруг себя коллег и единомышленников, щедро делился с ними своими знаниями и опытом. Его отличали доброта, отзывчивость, сердечность, интеллигентность, искрометный юмор, неординарность. Всю свою жизнь он демонстрировал широту и многогранность научных интересов, искреннюю любовь и преданность науке.

Светлая память о Леониде Мунеевиче Мешмане будет всегда жить в наших сердцах!

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

Продолжается
подписка
на журнал

2019

ПОЖАРОВЗРЫВО- БЕЗОПАСНОСТЬ



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

- Стоимость подписки на 1-е полугодие 2019 г. (3 номера) — 5901 руб.
- Стоимость годовой подписки (6 номеров) — 10260 руб.

ЭЛЕКТРОННАЯ ВЕРСИЯ:

- Стоимость подписки на 1-е полугодие 2019 г. (3 номера) — 2460 руб.
- Стоимость годовой подписки (6 номеров) — 4680 руб.

ПОДПИСКА ОСУЩЕСТВЛЯЕТСЯ:

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

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:

KA\PER\KY



RONEX Security



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.
РМРС № 16.00385.120 от 28.12.2016 г.