

3-2021

FIRE and EXPLOSION
SAFETY

ПОЖАРОВЗРЫВО-

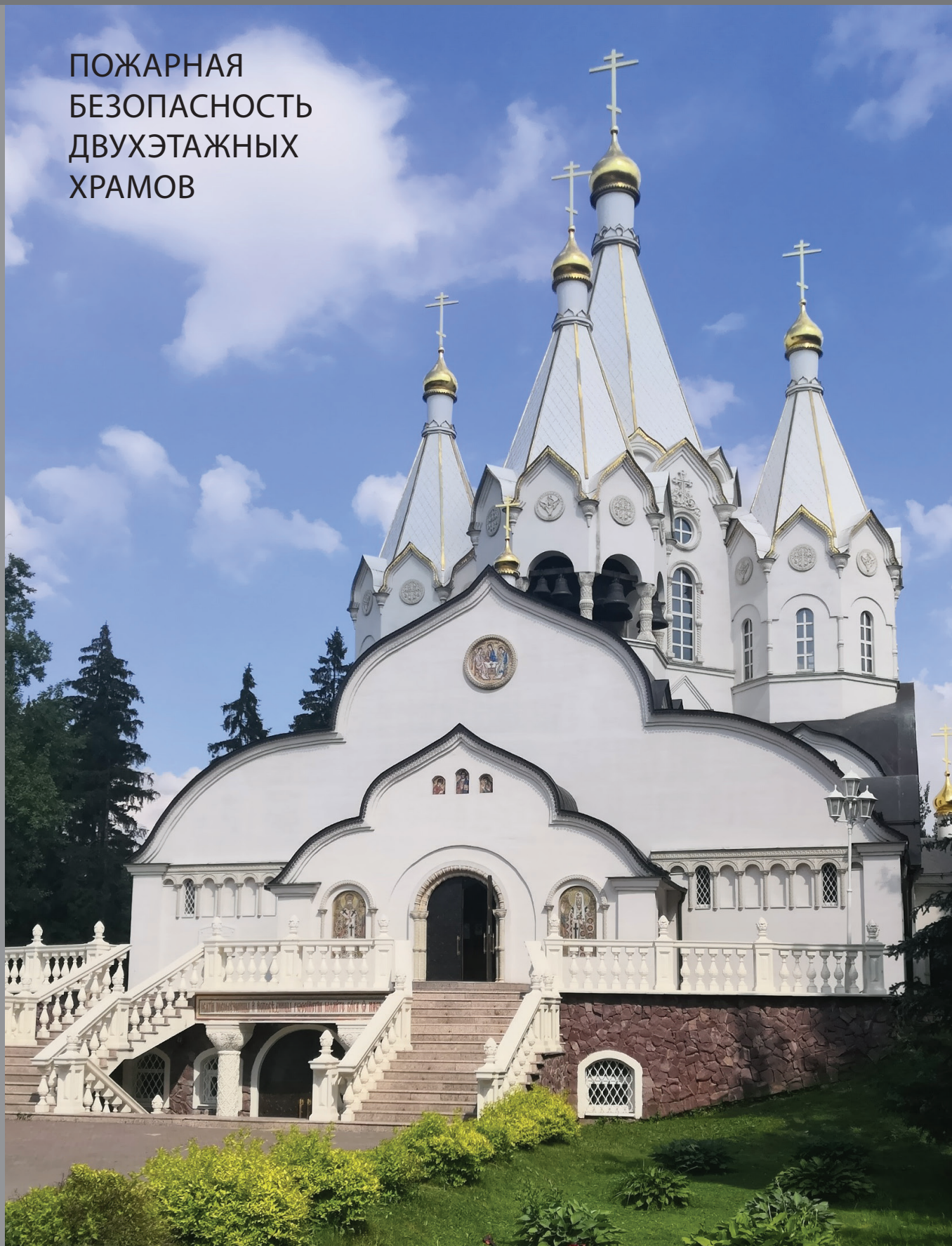
БЕЗОПАСНОСТЬ



НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКИЙ ЖУРНАЛ

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

ПОЖАРНАЯ
БЕЗОПАСНОСТЬ
ДВУХЭТАЖНЫХ
ХРАМОВ



КОМПЛЕКСНАЯ БЕЗОПАСНОСТЬ

пожарная • промышленная • производственная • экологическая



УЧРЕДИТЕЛЬ и ИЗДАТЕЛЬ —

ФГБОУ ВО «Национальный
исследовательский
Московский государственный
строительный университет»

Адрес:

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

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

СМИ зарегистрировано Федеральной
службой по надзору в сфере связи,
информационных технологий и массовых
коммуникаций — свидетельство
ПИ № ФС 77-79402 от 02 ноября 2020 г.

Префикс DOI: 10.22227

РЕДАКЦИЯ:

Выпускающий редактор **Дядичева А.А.**
Редактор **Махиянова Е.Б.**
Перевод на английский **Юденкова О.В.**
Корректор **Светличная Л.В.**
Дизайнер **Алейникова А.Г.**

Адрес редакции:

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

Адрес для переписки:

121352, Россия, г. Москва, а/я 26.

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

E-mail: info@fire-smi.ru

https://www.fire-smi.ru

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

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

Подписано в печать 25.06.2021.

Выход в свет 30.06.2021.

Формат 60 × 84 1/8. Тираж 2000 экз.

Бумага мелованная матовая.

Печать офсетная. Цена свободная.

Распространяется по подписке.

Отпечатано в типографии
Издательства МИСИ — МГСУ

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

Фото для оформления журнала взято с сайта: www.wikidata.org

ГЛАВНЫЙ РЕДАКТОР:

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

ЗАМ. ГЛАВНОГО РЕДАКТОРА:

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

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

РЕДАКЦИОННАЯ КОЛЛЕГИЯ:

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

Барбин Н.М., д. т. н., к. х. н., профессор, почетный работник науки и техники РФ
(Уральский институт Государственной противопожарной службы МЧС России, Ека-
теринбург, 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 физи-
ко-химических проблем Белорусского государственного университета, Минск,
Беларусь)

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

Топольский Н.Г., д. т. н., профессор, академик РАЕН и НАНПБ, заслуженный дея-
тель 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 (Академия
Государственной противопожарной службы МЧС России, 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 Рос-
сии, Балашиха Московской обл., Россия)

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

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

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

СОДЕРЖАНИЕ

CONTENTS

ПРОЦЕССЫ ГОРЕНИЯ, ДЕТОНАЦИИ И ВЗРЫВА

COMBUSTION, DETONATION AND EXPLOSION PROCESSES

В.А. ГОРЕВ
Модельная нагрузка при внутреннем взрыве

5

V. A. GOREV
Model load in case of an internal explosion

БЕЗОПАСНОСТЬ ВЕЩЕСТВ И МАТЕРИАЛОВ

SAFETY OF SUBSTANCES AND MATERIALS

А.О. ВОРОСИН, А.П. ПАРФЕНЕНКО
Исследование влияния прогрева от второстепенных
стальных конструкций без огнезащиты на предел
огнестойкости стальных балок в огнезащите

16

A.O. VOROSIN, A.P. PARFENENKO
The research into the heating effect of secondary steel
structures, having no fire proofing, on the fire resistance
of fireproof steel beams

МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ, ЧИСЛЕННЫЕ МЕТОДЫ И КОМПЛЕКСЫ ПРОГРАММ

MATHEMATICAL MODELING, NUMERICAL METHODS AND PROGRAM COMPLEXES

Е.В. СТЕПАНОВ, Д.В. ТАРАКАНОВ, Н.Г. ТОПОЛЬСКИЙ
Волновой алгоритм определения оптимального
маршрута движения газодымозащитников в зданиях
при пожарах и задымлениях

31

E.V. STEPANOV, D.V. TARAKANOV, N.G. TOPOLSKIY
The wave algorithm used to determine
the optimal indoor route for smoke divers
in case of fire and fumigation

БЕЗОПАСНОСТЬ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ И ОБОРУДОВАНИЯ

SAFETY OF TECHNOLOGICAL PROCESSES AND EQUIPMENT

Г.В. ПЛОТНИКОВА, К.Л. КУЗНЕЦОВ,
С.С. ТИМОФЕЕВА, Р.О. МОРОЗОВ, А.А. ШЕКОВ
Теплые полы как причина возникновения пожаров

41

G.V. PLOTNIKOVA, K.L. KUZNETSOV,
S.S. TIMOFEEVA, R.O. MOROZOV, A.A. SHEKOV
Underfloor heating as a cause of fire

БЕЗОПАСНОСТЬ ЗДАНИЙ, СООРУЖЕНИЙ, ОБЪЕКТОВ

SAFETY OF BUILDINGS, STRUCTURES, OBJECTS

С.Г. ЦАРИЧЕНКО, А.В. ОСТРОВОЙ,
С.В. КАРАСЕВ, М.Л. ПУГАЧЕВ
Исследования возможности применения беспилотных
авиационных систем для пожаротушения высотных
зданий и сооружений

54

S.G. TSARICHENKO, A.V. OSTROVOY,
S.V. KARASEV, M.L. PUGACHEV
A research into the potential application of unmanned
aerial vehicles in the fire extinguishing of high-rise
buildings and structures

В.И. ПРИСАДКОВ, С.В. МУСЛАКОВА, Д.В. УШАКОВ,
А.А. АБАШКИН, К.В. ПРИСАДКОВ
Пожарная безопасность двухэтажных храмов

65

V.I. PRISADKOV, S.V. MUSLAKOVA, D.V. USHAKOV,
A.A. ABASHKIN, K.V. PRISADKOV
The fire safety of two-storey church buildings

БЕЗОПАСНОСТЬ ЖИЗНЕДЕЯТЕЛЬНОСТИ

LIFE SAFETY

С.В. ПУЗАЧ, В.М. МУСТАФИН, Р.Г. АКПЕРОВ
Новый подход к расчету времени блокирования путей
эвакуации по потере видимости в дыму при пожаре
в помещении

76

S.V. PUZACH, V.M. MUSTAFIN, R.G. AKPEROV
A new approach to calculating the time to the blocking
of the escape routes due to the loss of visibility in the
smoke of an indoor fire

АВТОМАТИЗИРОВАННЫЕ СИСТЕМЫ И СРЕДСТВА

AUTOMATED SYSTEMS AND MEANS

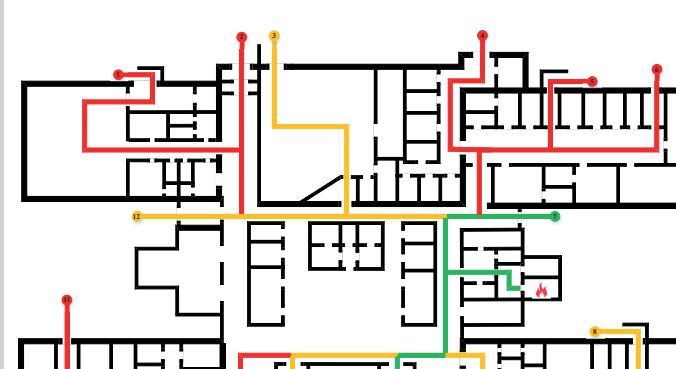
Л.Т. ТАНКЛЕВСКИЙ, А.А. ТАРАНЦЕВ,
И.А. БАБИКОВ, Д.В. ПОЛЯКОВ
О расчетной оценке эффективности тушения пожара
класса В спринклерными автоматическими установками

88

L. T. TANKLEVSKIY, A.A. TARANTSEV,
I.A. BABIKOV, D.V. POLYAKOV
Calculated assessment of effectiveness of class B fire
suppression using automatic fire sprinkler systems

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

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



Волновой алгоритм определения оптимального маршрута движения газодымозащитников в зданиях при пожарах

Стр. 31



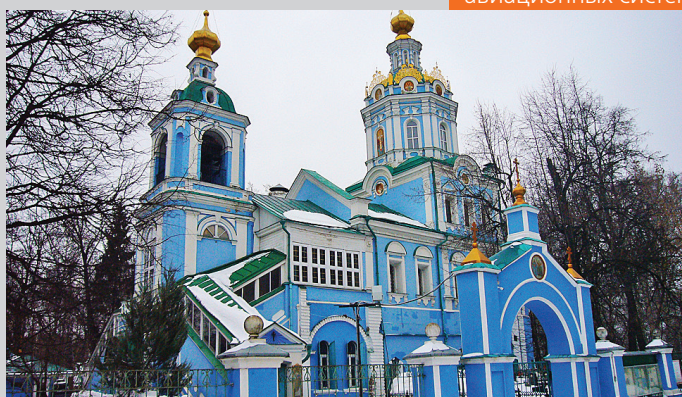
Стр. 41

Теплые полы как причина возникновения пожаров



Исследования возможности применения беспилотных авиационных систем для пожаротушения высотных зданий

Стр. 54



Стр. 65

Пожарная безопасность двухэтажных храмов



Стр. 76

Новый подход к расчету времени блокирования путей эвакуации по потере видимости в дыму при пожаре в помещении

КОМПЛЕКСНАЯ БЕЗОПАСНОСТЬ

пожарная • промышленная • производственная • экологическая



FOUNDER and PUBLISHER —

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

Address:

26 Yaroslavskoe shosse, Moscow,
129337, Russian

Journal founded in 1992,
issued 6 times per year.

Publication is registered by the Federal
Service for Supervision of Communications,
Information Technology, and Mass Media
of Russia. Registration certificate PI No.
FS 77-79402 on November 02, 2020.

DOI prefix: 10.22227.

EDITORIAL STAFF:

Executive editor **Dyadicheva A.A.**

Editor **Makhiyanova E.V.**

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

Corrector **Svetlichnaya L.V.**

Layout **Aleynikova A.G.**

Address of Editorial Staff:

26 Yaroslavskoe shosse, Moscow,
129337, Russia

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

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

E-mail: info@fire-smi.ru

https://www.fire-smi.ru

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

No part of this publication may be used
or reproduced in any form or by any means without
the prior permission of the Publishers. Reproducing
any part of this material a reference to the journal
is obligatory.

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

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

Signed for printing 25.06.2021.

Date of publication 30.06.2021.

Format is 60 × 84 1/8.

Printing is 2000 copies.

Chalk-overlay mat paper.

Offset printing. Free price.

Journal sells subscription.

Printing house of the Publishing house

MISI – MGSU

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

EDITOR-IN-CHIEF:

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

DEPUTY EDITOR-IN-CHIEF:

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

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

EDITORIAL BOARD:

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

A. Restas, Ph. D. (National University of Public Service, Institute of Disaster Management,
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 Engi-
neering, 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 Sci-
ences, 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 (State Fire
Academy of Emercom of Russia, 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 Sci-
ence (All-Russian Research Institute for Fire Protection of Emercom of Russia, Balashikha,
Moscow Region, Russia)

T.J. Shields, Ph. D., Professor (Ulster University, Newtownabbey, 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)

Модельная нагрузка при внутреннем взрыве

© В.А. Горев ✉

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

АННОТАЦИЯ

Введение. На сегодняшний день отсутствуют модельные нагрузки, описывающие действие внутреннего взрыва. Представленная в статье работа ставит своей целью построить модельную нагрузку, характеризующую внутренний взрыв с учетом использования инерционных предохранительных конструкций. В статье приведены соответствующие примеры.

Методы. Эксперимент и численное моделирование устанавливают характеристики внутреннего взрыва, определяющие его разрушительное действие. В первую очередь — это уровень и темп нарастания давления при формировании первого пика. После первого пика происходит спад и новый подъем до второго пика с последующим окончательным падением давления. Участок подъема до первого пика описывается кубической параболой. Постоянная величина давления, равная наибольшему значению из двух пиков, заменяет спад и подъем между пиками. Линейная зависимость описывает участок окончательного спада давления так, чтобы деформация в конечной точке заканчивалась. Время нарастания давления рассчитывается из условия вскрытия проема и с учетом характеристик предохранительных конструкций. Наступление второго пика определяется из условия достижения пламенем своей максимальной площади.

Результаты и их обсуждение. Деформация на первом участке вычисляется решением приведенного уравнения движения балки. Деформация между пиками оценивается на основе баланса энергии. На участке спада деформация определяется решением уравнения движения. На решение накладывается условие окончания деформации.

Выводы. Результаты показывают, что время между пиками имеет важное значение при давлениях, близких к пиковому. Анализ устанавливает условия, при которых деформация остается упругой. Результаты работы могут быть использованы при оценке несущей способности конструкции зданий взрывоопасных производств. Применение предложенной нагрузки дает консервативные результаты.

Ключевые слова: предохранительные конструкции; пик давления; взрывная нагрузка; упругая деформация; пластическая деформация; нарастание нагрузки

Для цитирования: Горев В.А. Модельная нагрузка при внутреннем взрыве // Пожаровзрывобезопасность/ Fire and Explosion Safety. 2021. Т. 30. № 3. С. 5–15. DOI: 10.22227/0869-7493.2021.30.03.5-15

✉ Горев Вячеслав Александрович, e-mail: kafedrapb@yandex.ru

Model load in case of an internal explosion

© Vyacheslav A. Gorev ✉

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

ABSTRACT

Introduction. Presently, there are no model loads that describe the burst effect of an internal explosion. The goal of the article is to design a model load that characterizes an internal explosion with regard for the effect of inertial safety structures. The author provides relevant examples.

Methods. The experiment and the numerical modeling identify the characteristics of an internal explosion, primarily, its destructive effect. First of all, these characteristics include the pressure value and rate in the process of the first peak formation. A drop follows the first peak. Another rise to the second peak is followed by the final pressure drop. The rise to the first peak is described by a cubic parabola. The constant value of pressure is equal to the highest value of the two peaks. It replaces the drop and rise between the peaks. The linear dependence describes the area of the final pressure drop, so that the deformation is completed at the end point. The time of the pressure rise is determined by breakup, and it takes account of the characteristics of safety structures. The time of the second peak is the time when the flame area is maximal.

Results and discussion. The deformation that may occur before the first peak represents a solution to the equation, describing the beam motion. This equation is provided in the article. The deformation between the peaks is determined by the balance of energy. The deformation, that occurs when the pressure drops, is identified by the solution to the motion equation. The solution is subject to the deformation completion condition.

Conclusions. The results show that the time between the peaks is important when the pressure is close to maximal. The analysis identifies the conditions under which deformation remains elastic. These results can

be contributed to the assessment of the bearing capacity of buildings that accommodate explosive production facilities. This approach ensures conservative results.

Keywords: safety structures; pressure peak; explosive load; elastic deformation; plastic deformation; load rise

For citation: Gorev V.A. Model load in case of an internal explosion. *Pozharovzryvobezopasnost/Fire and Explosion Safety*. 2021; 30(3):5-15. DOI: 10.22227/0869-7493.2021.30.03.5-15 (rus).

✉ Vyacheslav Aleksandrovich Gorev, e-mail: kafedrapb@yandex.ru

Введение

Внутренние аварийные взрывы продолжают происходить с регулярной частотой. Разрушительные последствия этих взрывов говорят о низкой эффективности существующих мер по защите строительных объектов¹. При анализе этих мер внутренние взрывы следует различать по их природе и механизму их протекания. Большинство таких взрывов относятся к квазистатическим, когда можно принять, что давление в помещении в каждый момент времени одинаково во всех точках его объема и изменяется только во времени. Такие взрывы характерны для промышленных предприятий с обращением углеводородов и для жилых помещений. При внешних аварийных взрывах расчет зданий на несущую способность ведется с использованием модельных нагрузок [1–3]. При внутренних квазистатических взрывах модельная нагрузка отсутствует. Это обусловлено влиянием предохранительных конструкций, действие которых сильно усложняет вопрос. До настоящего времени эта особенность не учитывалась. В [4–5] реальная динамическая нагрузка заменяется эквивалентной статической. Величина коэффициента динамичности не обосновывается. В [3] модельная нагрузка строится на основании грубых представлений о динамике давления при взрыве в замкнутом и разгерметизированном объеме. Влияние вскрытия проемов с использованием предохранительных конструкций не учитывается. В частности, принимается, что рост давления в замкнутом объеме при квазистатическом взрыве следует закону $\Delta P \sim t^5$ вплоть до конца взрыва, что время взрыва в замкнутом и разгерметизированном объеме одинаково, а истечение горячих продуктов взрыва не оказывает влияния на его характер. Все эти предположения противоречат известным экспериментальным фактам [6–7]. Зависимости, используемые для определения параметров взрыва, не объяснены и не сопровождаются ссылками. Таким образом, в настоящее время отсутствуют модельные взрывные нагрузки, опираясь на которые можно рассчитывать последствия от внутреннего взрыва, как это имеет место в случае внешнего взрыва. В результате имеется настоятельная необходимость в разра-

ботке модельных взрывных нагрузок при внутреннем взрыве, которые адекватно учитывают особенности протекания внутреннего взрыва с учетом влияния как вскрытия проемов, так и вскрытия проемов для сброса давления при квазистатическом характере взрыва.

В работе ставится цель построить модельную нагрузку, определяющую действие внутреннего взрыва. Для достижения цели необходимо определить влияние вскрытия предохранительных конструкций на динамику развития. Определить деформацию балочных конструкций на действие предложенной нагрузки.

Методы исследования

При взаимодействии взрывной нагрузки со строительными конструкциями будем различать три режима нагружения конструкции в зависимости от соотношения характерных времен действия нагрузки (взрыва) и времени развития деформации в конструкции. Режим импульсного нагружения характеризуется соотношением: $t_{ex}/t_c \leq 1$, режим квазистатического нагружения — соотношением $t_{ex}/t_c \geq 10$, где t_{ex} — характерное время действия взрывной нагрузки; t_c — характерное время деформации конструкции. При импульсном нагружении конечная деформация определяется импульсом взрывной нагрузки, при квазистатическом нагружении — величиной максимального давления взрыва.

Промежуточным значениям t_{ex}/t_c соответствует динамический режим нагружения, при котором конечная деформация определяется совместным влиянием и импульса, и максимального давления.

Приведенные границы разделения режимов носят условный характер, и точность результатов тем выше, чем лучше выполняются указанные условия.

Далее рассматривается случай квазистационарного взрыва с модельной нагрузкой, представленный на рисунке в виде диаграммы сопротивления.

Эта нагрузка конструируется следующим образом. Из соотношения

$$\Delta P_2 = \frac{U_{r_2}^2 (\sigma - 1)^2 K_f^2 V_0^{4/3} \rho_0}{2 S_0^2 K_p^2 \sigma} \quad (1)$$

определяется избыточное давление ΔP_2 в объеме, если задана открытая площадь сбросных проемов S_0 .

¹ Производственные здания (с изм. № 1 от 18 августа 2016 г.): (СП 56.13330.2011) : утвержден приказом Министерства регионального развития Российской Федерации (Минрегион России) от 30 декабря 2010 г. № 850 и введен в действие с 20 мая 2011 г.

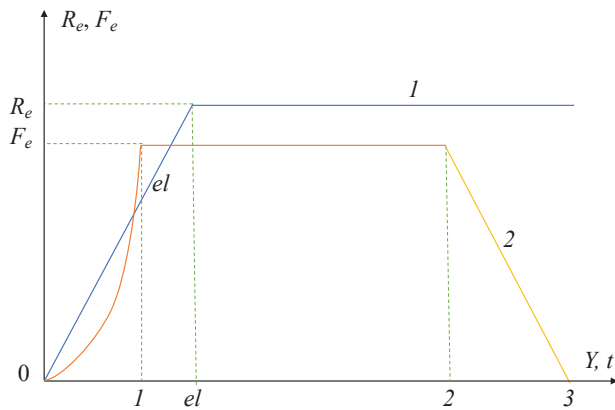


Диаграмма сопротивления: 1 — деформация; 2 — модельная нагрузка при внутреннем взрыве; R_e — эквивалентное сопротивление; F_e — эквивалентная нагрузка

Resistance diagram: 1 — deformation 2 — model load in case of an internal; R_e — equivalent resistance; F_e — equivalent load

Второй вариант заключается в том, что определяется требуемая площадь открытых проемов S_0 , если задано допускаемое давление ΔP_2 , такое, что изгибающий момент в самом опасном сечении при статическом нагружении с этой величиной давления не превышает внутреннего пластического момента сопротивления M_1 .

Давление ΔP_2 реализуется в момент максимальной площади горения, которая равна $K_f V_0^{2/3}$, где V_0 — свободный объем помещения; K_f — коэффициент, учитывающий форму помещения в формировании максимальной площади горения; $U_{г_2}$ — скорость горения в момент максимальной площади пламени; $K = 0,6$ — коэффициент расхода, учитывающий сужение струи истекающего газа по сравнению с площадью проема; σ — степень расширения газов при горении; ρ_0 — исходная плотность горючей смеси. В момент достижения максимальной площади горения реализуется пик давления. Другой пик давления ΔP_1 достигается в течение вскрытия предохранительных конструкций, когда площадь для истечения еще не достигла S_0 .

Предохранительная конструкция считается эффективной, если $\Delta P_1 \leq \Delta P_2$.

Как обеспечить это условие при использовании остекления в качестве предохранительной конструкции, изложено в [5]. В случае вскрытия инерционных предохранительных конструкций это условие выполняется, если только [8–9]:

$$\Delta P_2 > \Delta P_v (1 + \theta)^3 k_t^3, \quad (2)$$

где ΔP_v — давление, при котором разрушаются связи, удерживающие предохранительные конструкции;

величина $(1 + \theta)$ определяется из условия:

$$\frac{4}{B} = \frac{(1 + \theta)^5}{5} - (1 + \theta) + 0,8; \quad (3)$$

$$B = \frac{\Delta P_v^{5/3} (3V_0)^{2/3}}{\rho_n X_0 U_{г_1} P_0^{2/3} [4\pi\gamma(\sigma - 1)\sigma^2]^{2/3}}. \quad (4)$$

Величина k_t характеризует временной интервал от момента открытия проема до момента наступления первого пика P_1 и зависит от параметра B согласно табл. 1 [8]:

ρ_n — масса единицы площади предохранительной конструкции, кг/м²;

X_0 — глубина заделки предохранительной конструкции в проеме, м;

$U_{г_1}$ — скорость горения в момент вскрытия проема; $P_0 = 10^5$ Па.

В работах [10–13] отдельно рассмотрен случай, когда предохранительные конструкции расположены в плоскости внешней стороны ограждающей конструкции.

При построении модельной нагрузки за максимальное принимается большее из значений ΔP_2 и $\Delta P_v(1 + \theta)^3 k_t^3$, если не удастся снизить последнее. Нарастание давления от 0 до максимального ΔP_m происходит по закону:

$$\Delta P(t) = \Delta P_m \left(\frac{t}{t_1} \right)^3, \quad (5)$$

где $t_1 = t_v(1 + \theta)k_t$ — время достижения ΔP_m .

Следует отметить, что t_1 в (5) занижено по сравнению с реальным, так как при приближении к первому пику происходит отклонение от закона (5).

После достижения первого пика происходит спад давления, а потом опять подъем до значения ΔP_2 . Характер спада от ΔP_1 и подъем до ΔP_2 изучены недостаточно, поэтому в модельной нагрузке макси-

Таблица 1. Влияние параметра B на динамические характеристики первого пика давления

Table 1. Influence of the B parameter on the dynamic characteristics of the 1st peak

B	0,5	1	2	4	8	16	30	>30	∞
k_t^3	1,025	1,03	1,035	1,075	1,085	1,12	1,07	1,2	1,8
$1 + \theta$	2,16	1,91	1,71	1,54	1,41	1,31	1,26	1,2	1

мальное значение давления сохраняется на интервале $t_1 - t_2$ (см. рисунок).

Временной интервал $t_{12} = t_2 - t_1$ можно оценить, анализируя протекание взрыва. Очевидно, что

$$t_{12} = \frac{r_2 - r_1}{W_2},$$

где $r_2 = K_f V_0^{2/3} / 4\pi$ — эффективный радиус фронта пламени на втором пике;

$r_1 = U_{r_1} \sigma t_1$ — эффективный радиус на первом пике;

$w_2 = U_{r_2} \sigma_2$ — видимая скорость пламени на участке t_{12} ;

σ_2 — эффективная степень расширения, при ее определении учитывается истечение продуктов сгорания, которое уменьшает видимую скорость пламени. Эта величина зависит от давления взрыва и отношения $S_0 / V_0^{2/3}$. При взрывах в лабораторных условиях, соответствующих реальным условиям, $\sigma_2 = 0,6\sigma$.

В результате получается оценка:

$$\bar{t}_{12} = \bar{t}_1 \frac{W_1}{W_2} \left[\frac{(P_0 / \Delta P_v)^{1/3}}{k_l (1 + \theta)} - 1 \right]. \quad (6)$$

С учетом истечения продуктов горения эффективная скорость и степень расширения уменьшаются, а скорость горения U_{r_2} увеличивается из-за появления неустойчивости пламени в результате действия волны разрежения, которая вызывается сменой течения холодных исходных газов на горячие продукты горения. Действие этих процессов компенсируется взаимно, поэтому для оценок будет применяться $W_1 / W_2 \approx 1$.

Время спада нагрузки t_{23} мало влияет на конечную деформацию, и предположение о продолжительности этого участка будет применяться после рассмотрения деформации на интервале t_{12} .

Для рассмотрения деформации изгибаемых элементов представляется диаграмма сопротивления изгибу R , совмещенная с нагрузкой $F_m(t) = \Delta P(t) bL$, (см. рисунок):

$$\begin{aligned} R_y &= k_3 Y \text{ при } Y < Y_{el}; \\ R_m &= k_3 Y_{el} \text{ при } Y \geq Y_{el}. \end{aligned} \quad (7)$$

Для шарнирно-опертой балки:

$$R_m = \frac{8M_p}{L}, \quad k_3 = \frac{384EJ}{5L^5}. \quad (8)$$

Для балки, защемленной с двух концов:

$$R_m = \frac{8(M_{ps} + M_{pm})}{L}, \quad k_3 = \frac{307EJ}{L^5}. \quad (9)$$

Для балки, защемленной с одного конца и шарнирно-опертой с другого конца:

$$R_m = \frac{4(M_{ps} + 2M_{pm})}{L}, \quad k_3 = \frac{160EJ}{L^5}. \quad (10)$$

В выражениях (7)–(10) использованы следующие обозначения:

E — модуль упругости;

J — момент инерции сечения при изгибе;

Y_{el} — максимальный прогиб в конце упругой стадии;

$M_p = Z_p \sigma_T$ — максимальный внутренний момент сопротивления изгибу в сечении с пластическим моментом сопротивления изгибу Z_p ;

σ_T — динамический предел текучести деформируемого материала [14];

M_{ps} — пластический момент сопротивления в опорном сечении;

M_{pm} — пластический момент сопротивления в среднем сечении. Для равнопрочной балки $M_p = M_{pm} = M_{ps}$, поэтому

$$R_m = \frac{16M_p}{L}; \quad R_m = \frac{12M_p}{L} \quad (11)$$

для балок, зажатых с двух концов, а также зажатых с одного и шарнирно-опертой с другого.

Нелинейные диаграммы «сопротивление – деформация» используются для специальных железобетонных [15–17].

При рассмотрении изгибаемых конструкций удобно пользоваться эквивалентными системами, т.е. системами с приведенными силой и массой [6, 18].

Уравнение движения эквивалентной системы в упругой стадии описывается выражениями:

$$\begin{aligned} \ddot{\bar{Y}} + \bar{Y} &= B_f \left(\frac{\bar{t}}{\bar{t}_1} \right)^3; \\ \bar{Y} &= \frac{Y}{Y_{el}}; \quad \bar{t} = \frac{t}{t_c}; \quad t_c = \sqrt{\frac{M_l}{k_l}}; \\ M_l &= k_n M; \quad k_l = k_L k_3; \quad B_f = \frac{\Delta P_m bL}{R_m}. \end{aligned} \quad (12)$$

Коэффициенты приведения для массы и силы для случая статической линии прогиба в упругой стадии:

$$\left. \begin{aligned} k_n &= 0,5 \\ k_L &= 0,64 \\ k_n &= 0,41 \end{aligned} \right\} \text{ — для шарнирно-опертой балки;}$$

$$\left. \begin{aligned} k_L &= 0,53 \end{aligned} \right\} \text{ — для балки, зажатой с двух концов;}$$

$$\left. \begin{array}{l} k_n = 0,45 \\ k_L = 0,58 \end{array} \right\} \text{— для балки, зашцеиленной с одного} \\ \text{конца и шарнирно-опертой с дру-} \\ \text{гого}$$

При пластической деформации: $k_n = 0,33$, $k_L = 0,5$ для всех типов закрепления балок.

В данной работе рассматривается деформация для случая $F_m < R_m$. Для участка 0–1, где $\Delta P(t) = \Delta P_m(t/t_1)^3$ при упругой деформации решение (12) имеет вид [19].

$$\bar{Y} = B_f \Phi; \quad \bar{Y} = B_f \dot{\Phi}, \quad (13)$$

где

$$\Phi = \frac{6}{t_1^3} \left(\sin \bar{t}_1 - \bar{t}_1 + \frac{\bar{t}_1^3}{6} \right); \quad \dot{\Phi} = \frac{6}{t_1^3} \left(\cos \bar{t} - 1 + \frac{\bar{t}^2}{2} \right).$$

На участке 1– el решения уравнения движения имеют вид:

$$\begin{aligned} \Delta \bar{Y}_1 &= B_f \dot{\Phi} \cos \Delta \bar{t} + B_f (1 - \Phi) \sin \Delta \bar{t}; \\ \Delta \bar{Y}_1 &= B_f \dot{\Phi} \sin \Delta \bar{t} + B_f (1 - \Phi) (1 - \cos \Delta \bar{t}), \end{aligned} \quad (14)$$

где $\Delta \bar{Y}$ — безразмерное смещение конструкции после момента времени t_1 , т.е. $\Delta Y_1 = Y - Y_1$;

$\Delta \bar{t}$ — время, отсчитываемое от момента t_1 , $\Delta \bar{t} = \bar{t} - \bar{t}_1$.

При $\Delta \bar{Y}_1 = 1 - \bar{Y}_1 = 1 - B_f \Phi$ упругая стадия деформации заканчивается в момент времени $\Delta \bar{t}_{el} = \bar{t}_{el} - \bar{t}_1$. Этот момент определяется из второго уравнения (14) при $\Delta \bar{Y}_1 = 1 - B_f \Phi$ и равен

$$\Delta \bar{t}_{el} = 2 \arctg \frac{\bar{Y}_{el} - \bar{Y}_1}{(2B_f - 1 - B_f \Phi)}. \quad (15)$$

Дальше рассматривается случай, когда максимальная деформация является пластической и заканчивается на интервале $\bar{t}_1 - \bar{t}_2$ (см. рисунок). К моменту максимального пластического прогиба Y_m общая энергия деформации равна $R_e Y_m - 1/2 R_e Y_{el}$. Работа внешней силы $F(t)$ на участке 0 – Y_m складывается из работы на интервале 0 – t_1 , где сила изменяется по закону (5), и из работы постоянной силы F на участке $Y_1 - Y_m$. Сохранение энергии записывается для эквивалентной системы, так как закон будет универсальным для всех видов закрепления балок.

$$\begin{aligned} R_e Y_m - \frac{1}{2} R_e Y_{el} &= \frac{1}{2} k_e Y_1^2 + \frac{1}{2} m_e \dot{Y}_1^2 + F_e (Y_m - Y_1); \\ R_e &= k_e R_m; \quad m_e = k_n M; \quad F_e = k_e F. \end{aligned} \quad (16)$$

В результате для коэффициента пластичности получается:

$$\mu = \frac{1 + B_f^2 (\Phi_1^2 + \dot{\Phi}_1^2 - 2\Phi_1)}{2(1 - B_f)}. \quad (17)$$

Это выражение справедливо, т.е. его можно использовать, если максимальная деформация реализуется до момента спада нагрузки t_2 .

Из выражения (17) следует, что в приведенных эквивалентных системах коэффициенты пластичности получаются равными для одинаковых величин B_f и $\bar{t}_1$. Но следует иметь в виду, что силы сопротивления R_m и R_e и предельные упругие деформации различны для разных случаев закрепления балок. В результате абсолютные прогибы $Y_m = \mu_\infty Y_{el}$ получаются разными.

Если в выражении сохранения энергии (16) вместо Y_m подставить Y_{el} , то можно получить значение скорости в момент окончания упругой деформации $\dot{Y}_{el}$, если учесть, что $\bar{Y}_{el} = 1$. В результате получается:

$$\dot{Y}_{el}^2 = B_f^2 (\Phi^2 + \dot{\Phi}^2 - 2\Phi) + 2B_f - 1. \quad (18)$$

Пластическая стадия деформации описывается выражением

$$\dot{Y}_n = \dot{Y}_{el} - (1 - B_f) \Delta \bar{t}. \quad (19)$$

Время остановки после начала пластической деформации

$$\Delta \bar{t}_n = \frac{\dot{Y}_{el}}{(1 - B_f)}. \quad (20)$$

В результате коэффициент пластичности

$$\mu_\infty = 1 + \frac{\dot{Y}_{el}^2}{2(1 - B_f)}. \quad (21)$$

Нетрудно убедиться, используя (18), что выражения (17) и (21) совпадают. Эти выражения получены в предположении, что время торможения при пластической деформации $\Delta \bar{t}_n$ меньше времени действия максимальной взрывной нагрузки на стадии пластической деформации, т.е.

$$\Delta \bar{t}_n < \bar{t}_{12} - (\bar{t}_{el} - \bar{t}_1) = \Delta \bar{t}_{pl}. \quad (22)$$

В случае, если это условие не выполняется, то время торможения на участке, где внешняя нагрузка максимальна, равно $\bar{t}_2 - \bar{t}_{el}$, а скорость деформации в момент $\bar{t}_2$ равна

$$\dot{Y}_2 = \dot{Y}_{el} - (1 - B_f) (\bar{t}_2 - \bar{t}_{el}). \quad (23)$$

К моменту t_2 деформация будет равна

$$\bar{Y}_{23} = \bar{Y}_2 = 1 + \left[\bar{Y}_{el} - \frac{(1 - B_f)}{2} (\bar{t}_2 - \bar{t}_{el}) \right] (\bar{t}_2 - \bar{t}_{el}). \quad (24)$$

Наконец, на участке спада давления 2–3 движение конструкции определяется следующим соотношением

$$\bar{Y}_{23} = \bar{Y}_2 - (1 - B_f) \Delta \bar{t}_2 - \frac{B_f \Delta \bar{t}_2^2}{2 \bar{t}_{23}}, \quad (25)$$

где $\Delta \bar{t}_2$ — отсчитывается от $\bar{t}_2$,

$\bar{t}_{23}$ — время спада давления от максимального значения ΔP_m до 0.

При внутренних взрывах процесс спада давления не изучался подробно. Однако можно утверждать, что большим значениям $\bar{t}_{23}$ соответствуют большие деформации на этом участке. При небольших значениях $\bar{t}_{23}$ деформация может закончиться на этом участке. Но в общем отличие деформации на этом участке слабо сказывается на общей деформации. Здесь предлагается принять $\bar{t}_{23} = \bar{Y}_2 / (1 - B_f / 2)$.

При таком значении $\bar{t}_{23}$ остановка конструкции происходит как раз в момент $\bar{t}_3$. При этом смещение конструкции на этом участке $\Delta \bar{Y}_{23}$:

$$\bar{Y}_{23} = \frac{\bar{Y}_2^2}{2(1 - B_f / 2)}. \quad (26)$$

Результаты и их обсуждение

Ранее было заявлено, что в данной работе рассматриваются условия, приводящие к пластическим деформациям, если силовой фактор

$$B_f = \frac{F}{R_m} < 1.$$

Это означает, что в конце упругой стадии деформации конструкция еще обладает кинетической энергией, т.е. $\dot{Y}_{el} > 0$.

В табл. 2 представлены результаты вычислений скорости деформации исследуемой конструкции в конце упругой стадии деформирования для различных сочетаний силового фактора B_f и времени нарастания давления взрыва.

Определение скорости деформации $\dot{Y}_{el}$ выполнено по соотношению (18).

По этому же соотношению выполнен расчет предельного значения силового фактора B_{el} , при котором деформация не переходит в пластическую для указанного времени нарастания нагрузки. Эта величина расположена в последней строчке табл. 2.

В табл. 3 даны часто используемые при вычислении параметры, характеризующие деформацию

на стадии нарастания нагрузки, в зависимости от безразмерного времени нарастания нагрузки.

В табл. 4 приведены максимально возможные значения коэффициентов пластичности μ_∞ , которые реализуются при выполнении условия (24) при достаточно больших значениях $\bar{t}_{12}$.

Чтобы наполнить содержанием оценку (22) и использовать выражение (23), необходимо определить величину $\Delta \bar{t}_{el} = \bar{t}_{el} - \bar{t}_1$.

Эта величина представлена в табл. 5.

Ниже анализируется пример определения развития деформации при внутреннем взрыве.

Пример 1. Время пластической деформации на интервале $\bar{t}_{12}$:

$$\Delta \bar{t}_{pl} = \bar{t}_{12} - \Delta \bar{t}_{el} = 1,75 \cdot 4 - 0,83 = 6,17.$$

Скорость деформации к моменту $\bar{t}_1$ из (25):

$$\bar{Y}_2 = \bar{Y}_{el} - (1 - B_f) (\bar{t}_2 - \bar{t}_{el}) = 0,3955.$$

Деформация в момент $\bar{t}_2$ из (24):

$$\bar{Y}_2 = 1 + \left(0,704 - \frac{0,05 \cdot 6,17}{2} \right) 6,17 = 4,4.$$

Далее, учитывая (28), определяется деформация на участке спада давления 2–3:

$$\Delta \bar{Y}_{23} = \frac{\bar{Y}_2^2}{2(1 - B_f / 2)} = 0,149.$$

Суммарная деформация:

$$\mu_\Sigma = 4,44 + 0,149 = 4,59 < \mu_\infty = 5,96.$$

Суммарная деформация в данном случае меньше деформации, получающейся при очень большом значении $\bar{t}_{12}$.

Пример 2. $B_f = 0,9$; $B = 4$; $\bar{t}_1 = 5$; $\bar{Y}_{1el} = 0,562$; $\Delta \bar{t}_{el} = 0,65$.

Время полного торможения:

$$\bar{t}_n = \frac{0,562}{1 - 0,9} = 5,62.$$

Время пластической деформации: $t_{pl} = t_{12} - \Delta t_{el} = 8,1$.

Так как $\bar{t}_n < \bar{t}_{pl}$, т.е. остановка конструкции случится до момента времени $\bar{t}_2$, поэтому $\mu_\Sigma = \mu_\infty = 2,58$ (см. табл. 5).

Пример 3. $B_f = 0,95$; $B = 0,5$; $\bar{t}_1 = 0,5$; $\bar{Y}_{el} = 0,994$; $\Delta t_{el} = 1,5$; $P_v = 1,2$ кПа.

Из (6) $\bar{t}_{12} = 0,53$.

Это время меньше, чем $\bar{t}_{el}$, поэтому деформация на этом участке остается упругой и в конце времени $\bar{t}_{12} = 0,53$ согласно (14) $Y_2 = 0,58$; $Y_2 = 0,2$.

Таблица 2. Скорость деформации в конце упругой стадии в зависимости от B_f и $\bar{t}_1$ **Table 2.** Deformation velocity at the end of the elastic stage depending on B_f and $\bar{t}_1$

$B_f/\bar{t}_1$	0,5	1	2	3	4	5	7	10	20	30
0,5	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
0,6	0,443	0,432	0,387	0,310	0,198	—	—	—	—	—
0,7	0,629	0,618	0,576	0,510	0,425	0,327	0,065	—	—	—
0,8	0,770	0,759	0,715	0,646	0,560	0,466	0,288	0,127	—	—
0,9	0,890	0,878	0,829	0,754	0,662	0,562	0,382	0,247	0,091	—
0,95	0,944	0,930	0,880	0,800	0,704	0,600	0,413	0,277	0,134	0,088
B_{el}	0,501	0,505	0,519	0,542	0,573	0,612	0,695	0,772	0,869	0,909

Таблица 3. Величины, используемые для определения параметров деформации**Table 3.** Values used to identify deformation parameters

$\bar{t}_1$	0,5	1	2	3	4	5	7	10	20	30
Φ	0,0125	0,0488	0,182	0,365	0,054	0,714	0,889	0,937	0,986	0,993
Φ	0,124	0,242	0,458	0,558	0,595	0,566	0,424	0,289	0,200	0,0998
$\Phi^2 + \dot{\Phi}^2$	0,0155	0,0609	0,242	0,444	0,660	0,829	0,970	0,961	0,994	0,996
$\Phi^2 + \dot{\Phi}^2 - 2\Phi$	-0,0095	-0,0368	-0,140	-0,286	-0,447	-0,598	-0,808	-0,912	-0,977	-0,990

Таблица 4. Значение коэффициента пластичности при больших значениях $\bar{t}_{23}$ **Table 4.** The value of the plasticity coefficient if the values of $\bar{t}_{23}$ are high

$B_f/\bar{t}_1$	0,5	1	2	3	4	5	7	10	20	30
0,95	9,91	9,67	8,74	7,4	5,96	4,6	2,73	1,77	1,18	1,065
0,9	4,96	4,85	4,44	3,84	3,18	2,58	1,74	1,3	1,04	0,99
0,8	2,48	2,44	2,28	2,04	1,78	1,54	1,21	1,04	0,94	0,92
0,7	1,66	1,64	1,55	1,45	1,3	1,18	1,01	0,92	0,87	0,86
0,6	1,25	1,23	1,19	1,12	1,05	0,98	0,89	0,84	0,81	0,805

Таблица 5. Время развития упругой деформации на интервале $\bar{t}_{12}$ **Table 5.** Time of elastic deformation development in the course of the $\bar{t}_{12}$ section

$B_f/\bar{t}_1$	0,5	1	2	3	4	5	7	10	20	30
0,95	1,5	1,37	1,14	0,91	0,83	0,55	0,376	0,474	—	0,32
0,9	1,56	1,44	1,16	0,98	0,795	0,65	0,61	0,59	—	—
0,8	1,7	1,58	1,31	1,15	0,987	0,88	0,665	—	—	—
0,6	2,2	2,07	1,78	1,8	1,75	—	—	—	—	—
0,5	Деформация только в упругой стадии Deformation occurs at the elastic stage only									

Таким образом, перед спадом нагрузки в момент времени $\bar{t}_2$ деформация еще упругая.

Экспериментальные данные по спаду давления в таких условиях отсутствуют, работа внешней нагрузки определяется по среднему значению этой нагрузки, и тогда из сохранения энергии получается:

$$R_l Y_m - \frac{R_l Y_{el}}{2} = \frac{1}{2} k_e Y_2^2 + \frac{1}{2} m_e \dot{Y}_2^2 + \frac{F_e}{2} (Y_m - Y_2) \quad \text{или}$$

$$\mu_\Sigma \left(1 - \frac{3B_f}{4} \right) = \frac{1}{2} \left(\bar{Y}_2^2 + \dot{\bar{Y}}_2^2 \right) - \frac{3B_f}{4} \bar{Y}_2, \quad \mu_\Sigma = 1,8.$$

В записи закона сохранения энергии предполагается возможность появления пластических деформаций на стадии спада давления. Полученный результат сильно контрастирует с результатом: $\mu_\infty = 9,91$ для $\bar{t}_1 = 0,5$ и $B_f = 0,95$.

В работе представлены возможные способы расчета несущей способности балочных конструкций при внутреннем взрыве. При анализе деформации балочных конструкций во время квазистатических взрывов использовалась модельная нагрузка с фазой нарастания, соответствующей первому пику, а максимальная нагрузка принималась большей из двух пиков. Такая нагрузка является консервативной, так как выбирается максимальное значение давления для фазы с постоянным давлением, которая, в свою очередь, также является консервативной оценкой динамики давления между пиками.

На характер нагрузки значительное влияние оказывает как время нарастания давления $\bar{t}_1$, так и время между пиками давления $\bar{t}_{12}$. При больших временах давления характер нагружения — квазистатичный, коэффициент пластичности превышает значение $\mu_\infty > 2$ только для силового фактора $B_f > 0,9$.

При силовом факторе $B_f > 0,5$ деформация никогда не переходит в пластическую. Уровень деформации μ_∞ монотонно возрастает при увеличении силового фактора, что отражено в табл. 4. Однако временной интервал $\bar{t}_{12} - \Delta t_{el}$ часто недостаточен для завершения пластической деформации в условиях максимальной модельной нагрузки. Временной интервал $\bar{t}_{12}$ уменьшается с уменьшением объема помещения и увеличением скорости взрывного

горения вследствие уменьшения $\bar{t}_1$ (см. (6)). Вторым сомножителем в (6) также уменьшается при росте скорости горения и уменьшении объема. Это следует из (3) и (4). Вместе с тем Δt_{el} растет при уменьшении $\bar{t}_1$. Поэтому даже при больших значениях B_f (пример 3) деформация может не переходить в пластическую стадию.

Для оценки силового фактора B_f можно использовать данные работ [20–21], где приведены давления, при которых разрушаются некоторые конструкции. Однако стоит иметь в виду, что эти данные получены из экспериментов с взрывными волнами с ударным фронтом. Тем не менее в условиях малой величины параметра B за сохранение значения силового фактора B_f меньше единицы приходится «платить» утяжелением конструкции.

Выводы

В заключение следует отметить, что настоящая работа по существу является первой, в которой рассматривается вопрос деформации несущей конструкции при внутренних аварийных взрывах с учетом действия предохранительных конструкций. Это действие принимается во внимание как в величине расчетного максимального давления, так и в учете временного интервала между пиками давления. В работе рассматривается случай, когда взрывная нагрузка, регулируемая действием предохранительных конструкций, удовлетворяет требованию $B_f < 1$, которое, в свою очередь, означает невозможность пластической деформации на стадии роста давления в начале взрыва. Модельная нагрузка позволяет выполнить консервативную оценку деформации, так как максимальное давление действует в течение всего времени между пиками, и оно соответствует давлению на большем пике. В работе не учитываются условия работы конструкции, не рассматриваются вопросы надежности. Они оставлены на усмотрение заинтересованных лиц.

Автор полагает, что дальнейшие экспериментальные исследования внутренних взрывов с использованием предохранительных конструкций помогут учесть характер изменения давления между пиками и уточнить расчет деформации на участке спада давления.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Горев В.А., Плотников А.И. Устойчивость при внешних аварийных взрывах // Городской строительный комплекс и безопасность жизнеобеспечения граждан : сб. тр. науч.-практ. конф. М. : Изд-во АСВ, 2005. С. 32–45.
2. Попов Н.Н., Расторгуев Б.С., Забегаев А.В. Расчет конструкций на динамические специальные нагрузки. М. : Высшая школа, 1992. 319 с.
3. Расторгуев Б.С., Плотников А.И., Хуснутдинов Д.З. Проектирование зданий и сооружений при аварийных взрывных воздействиях. М., 2007. 152 с.

4. Пилюгин Л.П. Конструкции сооружений взрывоопасных производств (теоретические основы проектирования). М. : Стройиздат, 1988. 316 с.
5. Пилюгин Л.П. Обеспечение взрывоустойчивости зданий с помощью предохранительных конструкций. М. : Пожнаука, 2000. 224 с.
6. Baiker W.E., Cox P.A., Westine P.S., Kulesz J.J., Strehlow R.A. Explosion hazards and evaluation. Amsterdam-Oxford-New York : Elsevier, 1983. 840 p.
7. Горев В.А., Беляев В.В., Федотов В.Н. Условие начала вибрационного горения газа в разгерметизированном сосуде прямоугольной формы // Физика горения и взрыва. 1989. Т. 25. № 1. С. 31–34.
8. Горев В.А., Мольков В.В. О зависимости параметров внутреннего взрыва от устройства предохранительных конструкций в проемах ограждающих стен промышленных и жилых зданий // Пожаровзрывобезопасность/Fire and Explosion Safety. 2018. Т. 27. № 10. С. 6–25. DOI: 10.18322/PVB.2018.27.10.6-25
9. Gorev V.A. Ensuring explosion safety of residential buildings // MATEC Web of Conferences. 2018. Vol. 193. P. 03046. DOI: 10.1051/mateconf/201819303046
10. Gorev V., Salymova E. The use of sandwich-panels as a safety and easily thrown off designs for internal explosions // MATEC Web of Conferences. 2016. Vol. 86. P. 04025. DOI: 10.1051/mateconf/20168604025
11. Salymova E. Features of fire and explosion safety of buildings from a sandwich of panels // MATEC Web of Conferences. 2017. Vol. 106. P. 01041. DOI: 10.1051/mateconf/201710601041
12. Molkov V.V., Grigorash A.V., Eber R.M., Makarov D.V. Vented gaseous deflagrations: modelling of hinged inertial vent covers // Journal of Hazardous Materials. 2004. Vol. 116. Issue 1–2. Pp. 1–10. DOI: 10.1016/j.jhazmat.2004.08.027
13. Molkov V.V., Grigorash A.V., Eber R.M., Tamanini F., Dobashi R. Vented gaseous deflagrations with inertial vent covers: State-of-the-art and progress // Process Safety Progress. 2004. Vol. 23. Issue. 1. Pp. 29–36. DOI: 10.1002/prs.10002
14. Symonds P.S. Bounds for finite deflections of impulsively loaded structures with time-dependent plastic behavior // International Journal of Solids and Structures. 1975. Vol. 11. Issue. 4. Pp. 403–423. DOI: 10.1016/0020-7683(75)90077-3
15. Уткин Д.Г. Деформирование изгибаемых сталефибробетонных элементов со смешанным армированием при кратковременном динамическом нагружении // Вестник Томского государственного архитектурно-строительного университета. 2015. № 5. С. 80–89. URL: <https://vestnik.tsuab.ru/jour/article/view/91>
16. Плевков В.С., Колупаева С.Н., Кудряков К.Л. Расчетные диаграммы нелинейного деформирования базальтофибробетона при статических и кратковременных динамических воздействиях // Вестник Томского государственного архитектурно-строительного университета. 2016. № 3. С. 95–110. URL: <https://vestnik.tsuab.ru/jour/article/view/170>
17. Уткин Д.Г. Прочность изгибаемых сталефибробетонных элементов со смешанным армированием при кратковременном динамическом нагружении // Вестник Томского государственного архитектурно-строительного университета. 2017. № 6. С. 106–115. URL: <https://vestnik.tsuab.ru/jour/article/view/365>
18. Biggs J.M. Introduction to structural dynamics. New York : McGraw-Hill, 1964. 341 p.
19. Gorev V.A. Deformation of beam structures in an internal explosion // Journal of Physics: Conference Series. 2020. Vol. 1425. P. 012178. URL: 10.1088/1742-6596/1425/1/012178
20. Lyapin A., Korolchenko A., Meshalkin E. Expediency of application of explosion-relief constructions to ensure explosion resistance of production buildings // MATEC Web of Conferences. 2016. Vol. 86. P. 04029. DOI: 10.1051/mateconf/20168604029
21. Lyapin A., Korolchenko A., Meshalkin E. Analysis of causes of combustible mixture explosions inside production floor areas // MATEC Web of Conferences. 2016. Vol. 86. P. 04030. DOI: 10.1051/mateconf/20168604030

REFERENCES

1. Gorev V.A., Plotnikov A.I. Stability at external emergency explosions. *Urban building complex and safety of life support of citizens : Proceedings of scientific and practical conference*. Moscow, ASV Publ., 2005; 32–45. (rus).
2. Popov N.N., Rastorguev B.S., Zabegaev A.V. *Calculation of designs on inertial express reaction*. Moscow, Vysshaya shkola Publ., 1992; 319. (rus).

3. Rastorguev B.S., Plotnikov A.I., Khusnutdinov D.Z. *Design of buildings and structures under emergency explosive impacts*. Moscow, 2007; 152. (rus).
4. Pilyugin L.P. *Designs of constructions of explosive productions (theoretical bases of design)*. Moscow, Stroyizdat Publ., 1988; 316. (rus).
5. Pilyugin L.P. *Maintenance explosion proof buildings with relief designs*. Moscow, Pozhnauka Publ., 2000. 224. (rus).
6. Baiker W.E., Cox P.A., Westine P.S., Kulesz J.J., Strehlow R.A. *Explosion hazards and evaluation*. Amsterdam-Oxford-New York, Elsevier, 1983; 840.
7. Gorev V.A., Belyaev V.V., Fedotov V.N. Condition of the beginning of vibrational gas combustion in an unsealed vessel of rectangular shape. *Combustion, Explosion, and Shock Waves*. 1989; 25(1):31-34. (rus).
8. Gorev V.A., Molkov V.V. ON The dependence of internal explosion parameters on the installation of safety structures in the apertures of the protecting walls of industrial and residential buildings. *Pozharovzryvobezopasnost/Fire and Explosion Safety*. 2018; 27(10):6-25. DOI: 10.18322/PVB.2018.27.10.6-25 (rus).
9. Gorev V.A. Ensuring explosion safety of residential buildings. *MATEC Web of Conferences*. 2018; 193:03046. DOI: 10.1051/mateconf/201819303046
10. Gorev V., Salymova E. The use of sandwich-panels as a safety and easily thrown off designs for internal explosions. *MATEC Web of Conferences*. 2016; 86:04025. DOI: 10.1051/mateconf/2016-8604025
11. Salymova E. Features of fire and explosion safety of buildings from a sandwich of panels. *MATEC Web of Conferences*. 2017; 106:01041. DOI: 10.1051/mateconf/201710601041
12. Molkov V.V., Grigorash A.V., Eber R.M., Makarov D.V. Vented gaseous deflagrations: modelling of hinged inertial vent covers. *Journal of Hazardous Materials*. 2004; 116(1-2):1-10. DOI: 10.1016/j.jhazmat.2004.08.027
13. Molkov V.V., Grigorash A.V., Eber R.M., Tamanini F., Dobashi R. Vented gaseous deflagrations with inertial vent covers: State-of-the-art and progress. *Process Safety Progress*. 2004; 23(1):29-36. DOI: 10.1002/prs.10002
14. Symonds P.S. Bounds for finite deflections of impulsively loaded structures with time-dependent plastic behavior. *International Journal of Solids and Structures*. 1975; 11(4):403-423. DOI: 10.1016/0020-7683(75)90077-3
15. Utkin D.G. Deformation of fiber-reinforced concrete bending elements under dynamic load. *Vestnik Tomskogo gosudarstvennogo arkhitekturno-stroitel'nogo universiteta/JOURNAL of Construction and Architecture*. 2015; 5:80-89. URL: <https://vestnik.tsuab.ru/jour/article/view/91> (rus).
16. Plevkov V.S., Kolupaeva S.N., Kudyakov K.L. Calculating diagrams of nonlinear deformation of basalt fiber concrete under static and dynamic loads. *Vestnik Tomskogo gosudarstvennogo arkhitekturno-stroitel'nogo universiteta/JOURNAL of Construction and Architecture*. 2016; 3:95-110. URL: <https://vestnik.tsuab.ru/jour/article/view/170> (rus).
17. Utkin D.G. Fiber-reinforced concrete bending elements under dynamic load. *Vestnik Tomskogo gosudarstvennogo arkhitekturno-stroitel'nogo universiteta/JOURNAL of Construction and Architecture*. 2017; 6:106-115. URL: <https://vestnik.tsuab.ru/jour/article/view/365> (rus).
18. Biggs J.M. *Introduction to structural dynamics*. New York, McGraw-Hill, 1964; 341.
19. Gorev V.A. Deformation of beam structures in an internal explosion. *Journal of Physics: Conference Series*. 2020; 1425:012178. URL: 10.1088/1742-6596/1425/1/012178
20. Lyapin A., Korolchenko A., Meshalkin E. Expediency of application of explosion-relief constructions to ensure explosion resistance of production buildings. *MATEC Web of Conferences*. 2016; 86:04029. DOI: 10.1051/mateconf/20168604029
21. Lyapin A., Korolchenko A., Meshalkin E. Analysis of causes of combustible mixture explosions inside production floor areas. *MATEC Web of Conferences*. 2016; 86:04030. DOI: 10.1051/mateconf/20168604030

Поступила 22.03.2021, после доработки 02.04.2021;

принята к публикации 19.04.2021

Received March 22, 2021;

Received in revised form April 2, 2021;

Accepted April 19, 2021

Информация об авторе

ГОРЕВ Вячеслав Александрович, д-р физ.-мат. наук, профессор кафедры комплексной безопасности в строительстве, Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет, г. Москва, Российская Федерация; РИНЦ ID: 690901; ORCID: 0000-0002-5096-6722; e-mail: kafedrapb@yandex.ru

Information about the author

Vyacheslav A. GOREV, Dr. Sci. (Phys.-Math.), Professor of Department of Integrated Safety in Civil Engineering, Moscow State University of Civil Engineering (National Research University), Moscow, Russian Federation; ID RISC: 690901; ORCID: 0000-0002-5096-6722; e-mail: kafedrapb@yandex.ru

Исследование влияния прогрева от второстепенных стальных конструкций без огнезащиты на предел огнестойкости стальных балок в огнезащите

© А.О. Воросин^{1,2}✉, А.П. Парфененко²

¹ Филиал Линде ГмБХ (Россия, 443001, г. Самара, ул. Галактионовская, 102)

² Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет (Россия, 129337, г. Москва, Ярославское шоссе, 26)

АННОТАЦИЯ

Введение. В международной практике проектирования пассивной огнезащиты и согласно требованиям некоторых изготовителей огнезащиты рекомендуется наносить огнезащиту не только на основной элемент, для которого нормируется предел огнестойкости, но и на элементы, для которых отсутствуют требования по пределам огнестойкости. Примером могут служить поддерживающие кронштейны, опоры трубопроводов и прочие второстепенные строительные конструкции (ВСК), не являющиеся несущими элементами в соответствии с СП 2.13130.2020, которые крепятся к конструкциям в огнезащите. Для таких ВСК рекомендовано наносить огнезащиту (coatback of attachments) на длину не менее 450 мм от места крепления к конструкции в огнезащите при площади сечения ВСК более 3000 мм². Данная практика устройства «дополнительной» огнезащиты в российском проектировании и нормативных документах по пожарной безопасности отсутствует.

Предмет исследования. Изменение предела огнестойкости стальных балок в огнезащите от прогрева ВСК в зависимости от их площади сечения и места крепления.

Цель. Оценить степень влияния площади сечения и места крепления ВСК при нагреве на предел огнестойкости стальных балок в огнезащите.

Материалы и методы. Численное моделирование проводилось с помощью программного комплекса ANSYS Workbench 2020 R2 (студенческая версия).

Результаты. Моделирование показало, что ВСК без огнезащиты при нагреве влияет на предел огнестойкости конструкций в огнезащите.

Выводы. В существующей методике расчета огнестойкости стальных конструкций не учитывается возможность снижения предела огнестойкости от прогрева ВСК без огнезащиты. Результаты численного моделирования показали, что при проектировании огнезащиты необходимо учитывать возможное снижение предела огнестойкости конструкций в огнезащите от прогрева ВСК без огнезащиты. Для дальнейшей проверки влияния ВСК без огнезащиты на время достижения предельного состояния стальной балки в огнезащите требуется проведение огневых испытаний, а также дополнительных исследований для оценки влияния прогрева от ВСК на вертикальные конструкции в огнезащите, в том числе с учетом углеводородного режима пожара.

Ключевые слова: пожар; тепловой поток; метод конечных элементов; теплотехнический расчет; предельное состояние; ANSYS

Для цитирования: Воросин А.О., Парфененко А.П. Исследование влияния прогрева от второстепенных стальных конструкций без огнезащиты на предел огнестойкости стальных балок в огнезащите // Пожаровзрывобезопасность/Fire and Explosion Safety. 2021. Т. 30. № 3. С. 16–30. DOI: 10.22227/0869-7493.2021.30.03.16-30

✉ Воросин Анатолий Олегович, e-mail: vorosin@gmail.com

The research into the heating effect of secondary steel structures, having no fire proofing, on the fire resistance of fireproof steel beams

© Anatoliy O. Vorosin^{1,2}✉, Aleksandr P. Parfenenko²

¹ Branch of Linde GmbH (Galaktionovskaya St., 102, Samara, 443001, Russian Federation)

² Moscow State University of Civil Engineering (National Research University) (Yaroslavskoye Shosse, 26, Moscow, 129337, Russian Federation)

ABSTRACT

Introduction. The international practice of passive fire protection design, as well as some manufactures of fireproofing products recommend to apply fire proofing substances not only to the main element, whose fire resistance limit is standardized, but also to the elements that do not fall under any fire resistance standards. Various support brackets, pipeline supports (hereinafter — PS), etc. can serve as examples. They are not

considered as bearing elements according to SP (Construction Regulations) 2.13130.2020, although they are connected to the structures that have fireproofing applied. It is recommended to apply fireproofing substances to such PS within the range of, at least, 450 mm from the point of attachment to the fireproof structure when the area of the PS cross section exceeds 3,000 mm². No "supplementary" fireproofing is required by the Russian design and fire protection regulations.

The subject of research. A change in the fire resistance limit of steel *i*-girders, caused by the PS heating, depends on the area of the PS cross section and the location of the point of its attachment.

The goal. The goal of the research is to analyze the effect, produced by the area of the cross section and the point of attachment, on the fire resistance limit of fireproof steel *i*-girders in the course of heating.

Materials and methods. ANSYS Workbench 2020 R2 (student version) was applied to perform the numerical simulation.

Results. The simulation has shown that the PS, having no fireproofing, influences the fire resistance limit of fireproof structures.

Conclusions. Currently available methods of analysis of the fire resistance of steel structures take no account of the fire resistance limit reduction, caused by the heating of the PS that has no fireproofing. The numerical simulation has shown that the fire proofing design must take account of the potential reduction in the fire resistance limit of fireproof structures, exposed to the heated PS that has no fire proofing. The further verification of the effect, produced by the PS, that has no fireproofing, on the time to the limit state of a fireproof steel *i*-girder requires fire tests and supplementary investigations to evaluate the influence of the PS on the heating of vertical fireproof constructions, including the case of the hydrocarbon fire mode.

Keywords: fire; heat flow; finite element method; thermal design; limit state; ANSYS

For citation: Vorosin A.O., Parfenenko A.P. The research into the heating effect of secondary steel structures, having no fire proofing, on the fire resistance of fireproof steel beams. *Pozharovzrybobezopasnost/Fire and Explosion Safety*. 2021; 30(3):16-30. DOI: 10.22227/0869-7493.2021.30.03.16-30 (rus).

✉ Anatoliy Olegovich Vorosin, e-mail: vorosin@gmail.com

Введение

В настоящее время на объектах нефтегазового комплекса применяется значительное количество различных сооружений (этажерки, здания, насосные, эстакады и т.п.) из стальных конструкций, для которых нормируется предел огнестойкости.

Пределом огнестойкости конструкций согласно Федеральному закону «Технический регламент о требованиях пожарной безопасности»¹ называется промежуток времени от начала огневого воздействия в условиях стандартных испытаний до наступления одного из нормированных для данной конструкции предельных состояний.

Например, для этажерок, выполненных из металла, согласно СП 4.13130.2013² п. 6.10.5.14, предел огнестойкости должен быть не менее: для колонн этажерки — $R 120$, для балок и ригелей — $R 60$, где R — предельное состояние по потере несущей способности.

Актуальность темы обусловлена малой изученностью в России влияния прогрева второстепенных строительных конструкций (ВСК) на время достижения предельного состояния стальных конструкций с нормируемым пределом огнестойкости. При



Рис. 1. Пример нанесения огнезащиты Promat на ВСК

Fig. 1. Applying Promat fire proofing to PS

этом нужно отметить, что в международной практике проектирования огнезащиты [1] и согласно требованиям некоторых изготовителей огнезащиты, например Promat³ (рис. 1), рекомендуется наносить огнезащиту (coatback of attachments) на ВСК длиной 450 мм при площади сечения ВСК более 3000 мм². Данная практика в российском проектировании отсутствует.

Примером ВСК (рис. 2) являются кронштейны под кабельные лотки, опоры технологических трубопроводов и прочие конструкции, не влияющие на устойчивость здания или сооружения при пожаре, и на которые, как правило, огнезащита не наносится.

¹ Технический регламент о требованиях пожарной безопасности : Федеральный закон Российской Федерации от 22 июня 2008 г. № 123-ФЗ ; принят Государственной Думой 4 июля 2008 г. ; утвержден Советом Федерации 11 июля 2008 г.

² Системы противопожарной защиты. Ограничение распространения пожара на объектах защиты. Требования к объемно-планировочным и конструктивным решениям : (СП 4.13130.2013) : утвержден и введен в действие приказом МЧС России от 24 апреля 2013 г. № 288.

³ A simple method for calculation of coat back lengths. URL: <https://www.pfpnet.com/wp-content/uploads/2019/02/Coat-Back-Lengths-PROMAT-Paper.pdf> (дата обращения: 24.11.2020).

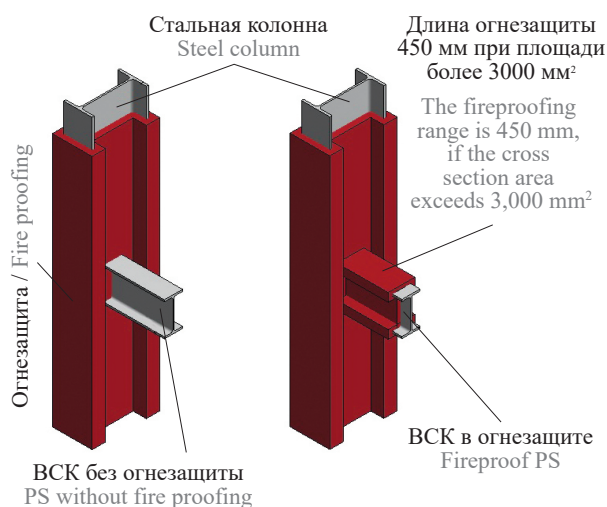


Рис. 2. Пример ВСК с огнезащитой и без огнезащиты

Fig. 2. Fireproof PS and PS that has not fireproofing

При исполнении работ по международным контрактам заказчики работ предъявляют требования к огнезащите согласно российскому законодательству, в котором отсутствуют требования по огнезащите ВСК. При этом иностранные подрядчики готовы нести ответственность за работу только в том случае, если ее результат соответствует не только российским нормам, но и международным стандартам и лучшим практикам проектирования.

Проблема исследования состоит в том, что современные нормативные документы по пожарной безопасности и проектированию огнезащиты не учитывают возможность прогрева от ВСК несущих стальных конструкций с нормируемым пределом огнестойкости, что влияет на снижение фактического предела огнестойкости конструкции.

Гипотеза: прогрев ВСК влияет на предел огнестойкости несущих стальных конструкций.

Цель статьи — оценить степень влияния площади сечения и места крепления ВСК при нагреве на предел огнестойкости стальных балок в огнезащите на основании моделирования в программном комплексе ANSYS.

Обзор литературы

Основы принципа расчета строительных конструкций на огнестойкость заложены в работах А.И. Яковлева, В.И. Мурашева, А.Ф. Милованова, В.М. Ройтмана и др.

В работе [2] расчет огнестойкости стальных конструкций сводится к статическому (прочностная задача) и теплотехническому расчетам. В статическом расчете определяется критическая температура, при которой конструкция может нести нормативную нагрузку. В теплотехническом расчете на основании уравнения теплопроводности Фурье

определяется время (предел огнестойкости), за которое конструкция прогреется до критической температуры. Поскольку из-за высокой теплопроводности металла распределение температур по толщине принимают равномерным, это позволяет рассчитывать стержневые конструкции как одномерные пластины, у которых температура меняется только в одном направлении — по толщине пластины, а другая часть пластины имеет идеальную теплоизоляцию.

В работе [3] автор наряду с основной теорией огнестойкости рассматривает статический и кинематический подходы к решению прочностной задачи огнестойкости конструкций. По мнению автора, статический подход не дает возможности достаточно полно учитывать при оценках огнестойкости особенности температурных режимов реальных пожаров. Кинематический подход в отличие от статического позволяет учитывать не только температуру материала, но и длительность, и интенсивность воздействия пожарной нагрузки, т.е. всю термическую «историю» воздействия пожара. Согласно работе [4], автор также предлагает ввести понятие огнестойкости строительных материалов, основываясь на кинематической концепции о природе разрушения и прочности твердых тел. Кроме этого в работах [5, 6] при развитии теории огнестойкости конструкций, зданий и сооружений авторы предлагают учитывать комбинированные особые воздействия с участием пожара. К особым воздействиям можно отнести, например, чрезвычайные ситуации, связанные с террористическими актами и т.п.

В работе [7] авторы приводят методологию расчета огнестойкости центрально-нагруженных, изгибаемых и внецентренно нагруженных стальных элементов, а также общие положения теплотехнического расчета стальных конструкций. Авторы также указывают на недостатки отечественного метода испытаний на огнезащитную эффективность средств огнезащиты.

В 2018 г. были разработаны методические рекомендации СТО АРСС 11251254.001-018-03 «Проектирование огнезащиты несущих стальных конструкций с применением различных типов облицовок»⁴. Расчет огнестойкости по данным рекомендациям сводится к решению прочностной и теплотехнической задач. Нужно отметить, что данный стандарт имеет статус нормативного документа по пожарной безопасности.

В работе [8] приводится методика определения требуемой толщины вспучивающегося покрытия на стальной конструкции для обеспечения заданного предела огнестойкости в зависимости от задан-

⁴ СТО АРСС 11251254.001-018-03. Проектирование огнезащиты несущих стальных конструкций с применением различных типов облицовок : утвержден приказом Генерального директора Ассоциации развития стального строительства № 08/01 от 30 августа 2018 г. и введен в действие с 3 сентября 2018 г.

ных значений дисперсии предела огнестойкости, приведенной толщины металла и доверительной вероятности. В работе [9] исследуется влияние углеводородного пожара на пределы огнестойкости незащищенных конструкций. Доказано, что при различных температурных режимах пожара конструкции будут иметь различный предел огнестойкости.

В работе [10], согласно выполненному расчету, в программном комплексе SCAD автор указывает на недостатки при определении пределов огнестойкости по критическим температурам по европейским нормам.

Согласно СП 2.13130.2020⁵, пределы огнестойкости несущих конструкций в огнезащите могут быть определены экспериментальным путем по ГОСТ 30247.1–94⁶ или расчетно-аналитическим методом с учетом экспериментальных данных огнезащитной эффективности средств огнезащиты и дополнительных испытаний колонн и балок в огнезащите под воздействием нагрузок по ГОСТ Р 53295–2009⁷. Расчетно-аналитический метод состоит из совместного решения прочностной задачи с учетом заданных условий нагружения и опирания конструкции и тепло-технической задачи.

В общем случае обеспечение требуемого предела огнестойкости достигается применением теплоизоляционного покрытия необходимой толщины, обеспечивающего тепловую защиту металлических конструкций от воздействия тепловой нагрузки [11].

Во всех приведенных выше работах не учитывается возможное влияние прогрева ВСК на предел огнестойкости стальных конструкций в огнезащите, что рекомендовано учитывать в международной практике проектирования.

В двух наиболее известных международных исследованиях [12, 13] по данной теме содержатся различные выводы о влиянии прогрева второстепенных металлических конструкций на стальные балки.

В работе [12] авторы исследуют влияние прогрева основной балки из двутавра HEA 240 в огнезащите от второстепенных балок из двутавра HEA-10 без огнезащиты. Причем второстепенные балки были приварены с шагом 600 мм с обеих сторон стенки основ-

ной балки. Количество второстепенных балок HEA-10 — 7 шт. На все второстепенные балки действовал углеводородный режим пожара с учетом Норвежских норм. К основной балке прикладывалась сосредоточенная нагрузка 92 кН, при которой напряжение составляло 150 МПа (42 % от предела текучести). Нагрузка снижалась постепенно до 30 кН с шагом 10 кН после выявления прогиба в 30 мм на 50-й минуте эксперимента. В ходе эксперимента было выявлено, что при отсутствии огнезащиты на второстепенных балках основная балка несет нагрузку 100 кН·м на 3 мин меньше, чем если бы все балки были в огнезащите, т.е. установлено незначительное влияние прогрева на основную балку через второстепенные балки без огнезащиты. По мнению авторов, результат эксперимента показал, что длина огнезащиты второстепенных балок может быть уменьшена по сравнению со стандартной длиной 450 мм, если предельное состояние рассматривать по пределу текучести, а не по температуре.

В работе [13] авторы исследуют влияние прогрева на основную балку из составного двутавра 240 (толщина стенки и полка 12 мм) от второстепенных балок из трубы квадратного профиля. Причем второстепенные балки приварены с шагом 1000 мм с обеих сторон стенки основной балки. Количество второстепенных балок — 4 шт. Основная балка в огнезащите, второстепенные балки моделировались без огнезащиты и в огнезащите различной длины (30, 45, 60, 100 см). На все балки действовала пожарная нагрузка 200 кВт/м². К основной балке была приложена равномерно распределенная нагрузка 30 кН/м. Также дополнительно были исследованы нагрузки 15, 22,5 и 37,5 кН/м. Авторы считают, что длина огнезащиты 450 мм второстепенных балок является оптимальной, и нанесение огнезащиты длиной более 450 мм на второстепенные балки не оказывает существенного влияния на повышение температуры основной балки. Использование огнезащиты на второстепенных балках эффективно при действии больших нагрузок на основную балку.

Моделирование конструкций в работах [12, 13] было выполнено методом конечных элементов в программном комплексе USFOS.

В работе [14] выполнены исследования о подборе необходимой длины огнезащиты ВСК при условии, что несущая конструкция не должна нагреваться до температуры более 500 °С (критерий предельного состояния — достижение конструкцией критической температуры, а не деформации или разрушения). Авторы также установили факторы, которые влияют на выбор длины огнезащиты ВСК. Моделирование огнезащиты в работе выполнено методом конечных элементов в программном комплексе ABAQUS.

В работе [15] группа авторов анализирует оптимизацию устройства огнезащиты для нефтехим-

⁵ Системы противопожарной защиты. Обеспечение огнестойкости объектов защиты : (СП 2.13130.2020) : утвержден и введен в действие приказом МЧС России от 12 марта 2020 г. № 151.

⁶ ГОСТ 30247.1–94. Конструкции строительные. Методы испытаний на огнестойкость. Несущие и ограждающие конструкции : принят Межгосударственной научно-технической комиссией по стандартизации и техническому нормированию в строительстве (МНТКС) 17 ноября 1994 г.

⁷ ГОСТ Р 53295–2009. Средства огнезащиты для стальных конструкций. Общие требования. Метод определения огнезащитной эффективности : утвержден и введен в действие приказом Федерального агентства по техническому регулированию и метрологии от 18 февраля 2009 г. № 71-ст.

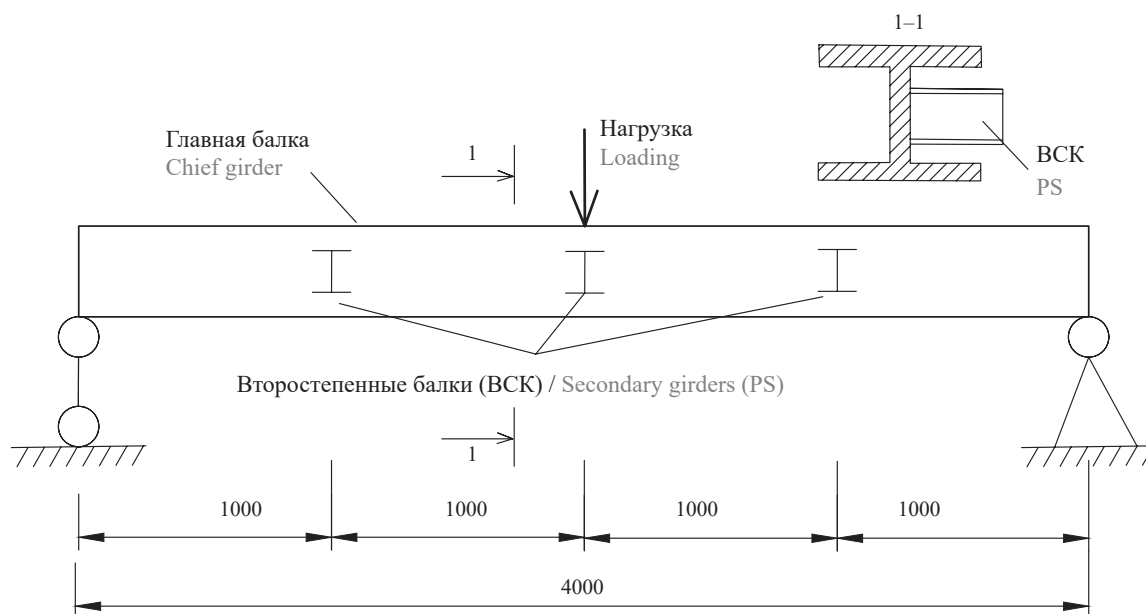


Рис. 3. Расчетная схема

Fig. 3. Design pattern

мических производств, в том числе исследуется влияние прогрева ВСК на несущую способность нагруженной колонны. Согласно выполненному ими расчету в программном комплексе ABAQUS, длина огнезащиты ВСК может быть уменьшена до 200 мм, а на отдельных участках вообще удалена.

В исследованиях [12–15] недостатком является отсутствие анализа влияния площади сечения ВСК и места ее крепления на время достижения предельного состояния.

В работах [16, 17] авторы выполняют анализ влияния частичной огнезащиты стальной балки на ее прогрев при моделировании углеводородного сценария пожара. Моделирование выполнялось в программных комплексах ABAQUS и FAHTS/USFOS соответственно. Согласно результатам исследования, сделан вывод о том, что частичная огнезащита (с трех сторон) допускается для использования только в технически обоснованных случаях при условии подтверждения расчетом устойчивости балок как по отдельности, так и по всей геометрической системе в целом.

В работе [18] авторы выполняют анализ прогрева стальных конструкций с частичной и полной огнезащитой наружной поверхности. Моделирование выполнялось в программном комплексе ANSYS. По результатам исследования предложена расчетная модель, которую можно использовать для прогнозирования прогрева как полностью, так и частично защищенных стальных конструкций вспучивающимся огнезащитным составом.

Исследования [16–18] направлены на изучение влияния прогрева на стальные конструкции с частичной огнезащитой.

Методика проведения исследования

Моделирование осуществлялось методом конечных элементов в программном комплексе ANSYS Workbench 2020 R2 (студенческая версия) с учетом ограничения по количеству узлов/элементов до 32 000. Теплотехнический расчет выполнен в модуле Transient Thermal. Результаты расчета (тепловые поля, распределенные во времени) импортированы в модуль Static Structural. Предел огнестойкости основной конструкции (главной балки) изначально принят R 120. Расчетная схема приведена на рис. 3. Общий вид модели приведен на рис. 4.

Принятые сечения балок:

- главная балка — двутавр 20Б1 по ГОСТ Р 57837–2017⁸ с толщиной стенки 5,5 мм и толщиной полки 8 мм. Высота двутавра — 200 мм, ширина — 100 мм;
- второстепенная балка (ВСК) — составной двутавр с толщиной стенки и полок 5 мм. Высота двутавра — 100 мм, ширина — 50 мм.
- Свойства материалов:
- марка стали для главной и второстепенных балок принята ВСт3пс по ГОСТ 380–2005⁹;

⁸ ГОСТ Р 57837–2017. Двутавры стальные горячекатаные с параллельными гранями полок. Технические условия : утвержден и введен в действие приказом Федерального агентства по техническому регулированию и метрологии от 24 октября 2017 г. № 1515-ст.

⁹ ГОСТ 380–2005. Сталь углеродистая обыкновенного качества. Марки : принят Межгосударственным советом по стандартизации, метрологии и сертификации (протокол № 28 от 9 декабря 2005 г.).

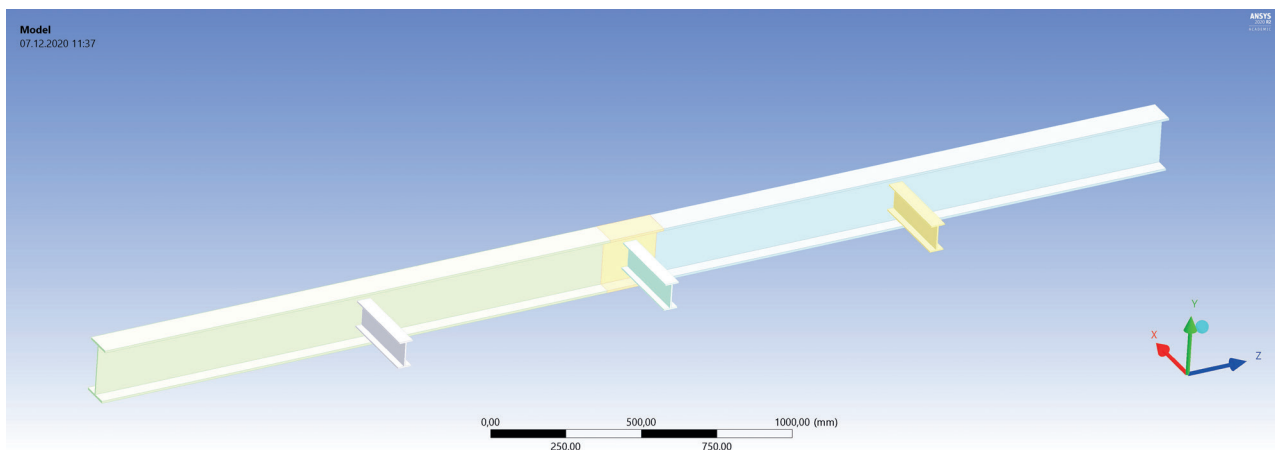


Рис. 4. Общий вид 3D модели

Fig. 4. The general view of the 3D model

- предел текучести и временное сопротивление в зависимости от температуры приняты по экспериментальным данным из работ [19, 20];
- модуль упругости стали при температуре 20 °С принят 210 000 МПа. Изменение модуля упругости в зависимости от температуры принято по стандарту СТО АРСС 11251254.001-018-03;
- коэффициент Пуассона принят 0,3;
- теплопроводность стали принята 53,3 Вт/(м·°С) при температуре 20 °С. Изменение теплопроводности в зависимости от температуры принято по линейному закону согласно стандарту EN 1993-1-2: 2005¹⁰;
- теплоемкость стали принята 440 Дж/(кг·°С) при температуре 20 °С. Изменение теплоемкости в зависимости от температуры принято по линейному закону согласно стандарту EN 1993-1-2:2005;
- свойства ползучести заданы аналогично работе [21] по закону Нортон (степенной закон) через параметр Зинер-Холломоуна (Z) с учетом влияния изменения температуры по Аррениусу [22]:

$$Z = \varepsilon_{cr} \exp\left(\frac{Q}{RT}\right) = C_1 \sigma^{C_2}; \quad (1)$$

$$\varepsilon_{cr} = C_1 \sigma^{C_2} \exp\left(-\frac{Q}{RT}\right) = C_1 \sigma^{C_2} e^{-\frac{C_3}{T}}; \quad (2)$$

$$C_3 = \left(\frac{Q}{R}\right), \quad (3)$$

где R — универсальная газовая постоянная, $R = 8,31$ Дж/(моль·К);

T — абсолютная температура, К;

Q — энергия активации, кДж/моль;

C_1, C_2 — константы материала.

¹⁰ EN 1993-1-2:2005+AC 2005 (E) Eurocode 3: Design of steel structures. Part 1-2: General rules. Structural fire design (Еврокод 3. Проектирование стальных конструкций. Часть 1-2. Общие правила определения огнестойкости).

Таблица 1. Константы ползучести

Table 1. Constant values of creep

Температура, К Temperature, K	Константы Constant values		
	C_1	C_2	C_3
873	3,74	4,3	27 200
773	0,000 148 843	6,43	27 200

Константы C_1, C_2 получены методом наименьших квадратов путем аппроксимации экспериментальных данных из работ [19, 20].

Константа C_3 принята из работы [19].

Теплотехнический расчет. Главная балка моделируется в программном продукте ANSYS без теплоизоляционного слоя огнезащиты. Вместо огнезащиты подобран специальный тепловой поток, который обеспечивает нагрев главной балки в течение 120 мин до температуры, не превышающей критическую, равную 350 °С, без учета влияния ВСК. При этом динамика нагрева главной балки аналогична стандартным испытаниям по ГОСТ 30247.0–94. Критическая температура определена при сосредоточенной нагрузке 3,5 т. Влияние прогрева от ВСК моделируется путем огневого воздействия на второстепенные балки через конвекцию и излучение. Далее нагретая второстепенная балка передает тепло на главную балку.

Статический расчет. К середине главной балки приложена сосредоточенная нагрузка 3,5 т. Площадь поверхности опирания составляет 20 см². Нагрузка действует постоянно в течение 120 мин без изменений во времени. Расчет выполнен с учетом изменения свойств материала из-за температуры во времени.

Результаты исследования

Теплотехнический расчет. Задача теплотехнического расчета — получить распределение температурных полей в главной балке от действия пожарной нагрузки (прямой, действующей на главную

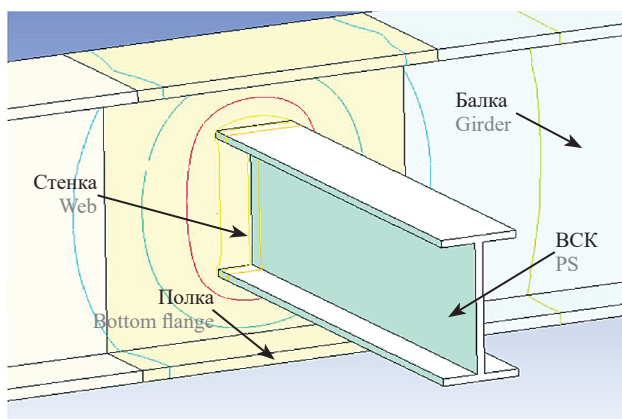


Рис. 5. Места измерения температуры

Fig. 5. Points of thermometry

балку и через второстепенные балки без огнезащиты). С точки зрения наиболее значимых для дальнейшего статического расчета мест по деформациям выбраны нижняя полка двутавра основной балки и грань стенки двутавра ВСК в середине крепления к основной балке, где действует максимальный изгибающий момент (рис. 5).

Распределение температуры по главной балке, ВСК, а также в месте стыковки ВСК и главной балки по стенке и полке главной балки приведено на рис. 6.

Из рис. 6 следует, что температура стенки главной балки в месте примыкания ВСК («Стенка») больше температуры полки главной балки («Полка»). На 120-й минуте эта разница составляет 261 °С.

Критическая температура 350 °С для стенки достигается на 6-й минуте, для полки (где действуют максимальные напряжения) — на 17-й минуте (табл. 2).

Таблица 2. Время достижения температуры в стенке и полке главной балки

Table 2. The time needed by the web and the bottom flange of the girder to reach the temperature

Температура, °С Temperature, °C	Время достижения температуры, мин Time-to-temperature, min	
	Стенка Web	Полка Bottom flange
350	6	17
400	7	21
450	9	32
500	12	47
550	16	65
600	22	89
650	29	118
654	—	120
700	39	—
750	51	—
800	68	—
850	86	—
900	110	—
915	120	—

Максимальная температура в полке составляет 654 °С.

Максимальная температура в стенке составляет 915 °С.

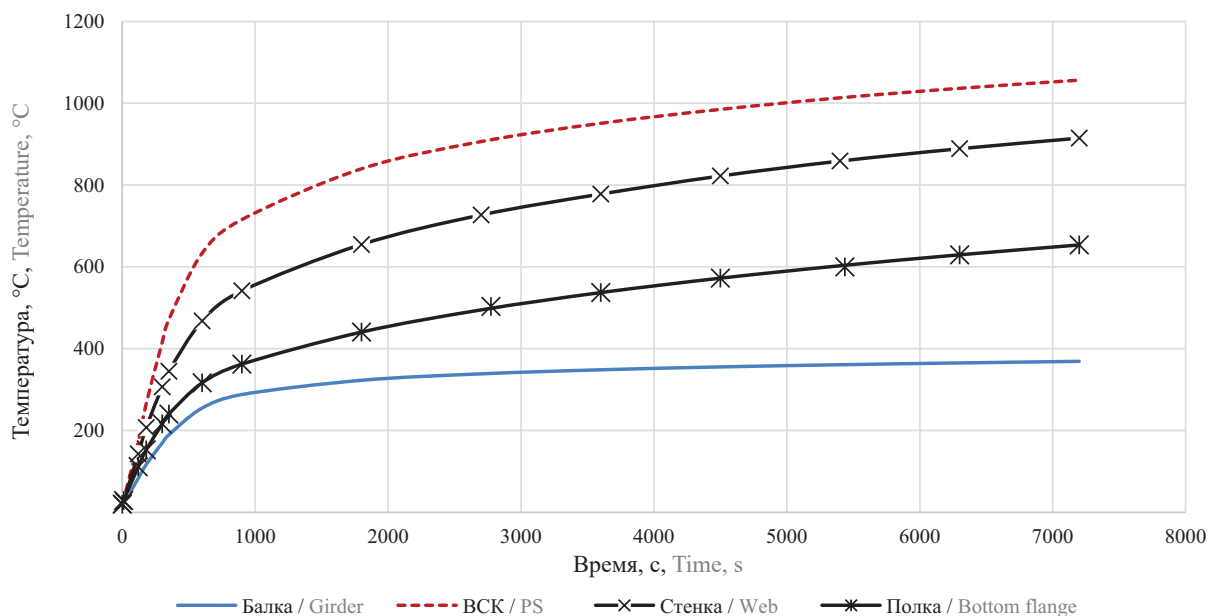


Рис. 6. Распределение температуры во времени согласно теплотехническому расчету

Fig. 6. The time-temperature distribution pursuant to the thermal design

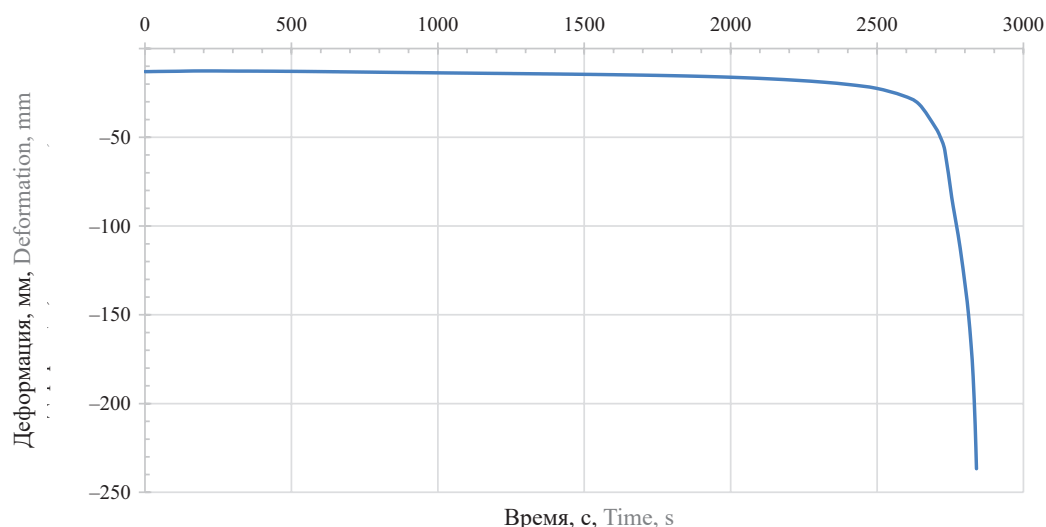


Рис. 7. Деформация балки в зависимости от времени

Fig. 7. Time-dependent beam deformation

Статический расчет. Задача статического расчета — определить деформации главной балки от совместного действия статической нагрузки с учетом полученных температурных полей из теплотехнического расчета.

Деформация балки (прогиб) в случае отсутствия огневого воздействия составляет 13 мм.

Деформации балки с учетом огневого воздействия в зависимости от времени приведены на рис. 7, с учетом огневого воздействия в зависимости от температуры — на рис. 8.

Согласно выполненному расчету: прогиб балки в нижней полке на 30-й минуте (1800 с) составляет 15 мм; прогиб балки в нижней полке на 45-й минуте (2700 с) — 45 мм; прогиб балки в нижней полке на 47-й минуте (2840 с) — 237 мм. Вертикальные деформации по оси Y на 47-й минуте приведены на рис. 9.

Согласно ГОСТ 30247.1–94, предельной деформация главной балки считается при следующих условиях:

- прогиб достиг величины 20 см;
- или скорость нарастания деформации достигла 0,89 см/мин.

Из рис. 7 следует, что предельная деформация, равная 20 см, достигается на 47-й минуте. При этом скорость нарастания деформации составляет 37,1 см/мин, что больше предельно допустимой скорости нарастания деформации 0,89 см/мин.

Скорость нарастания деформации 0,89 см/мин достигается на 44-й минуте.

Время достижения предельного состояния по условию нарастания скорости нарастания деформации принято 44 мин.

Предельное состояние в большей степени достигается за счет потери устойчивости верхней

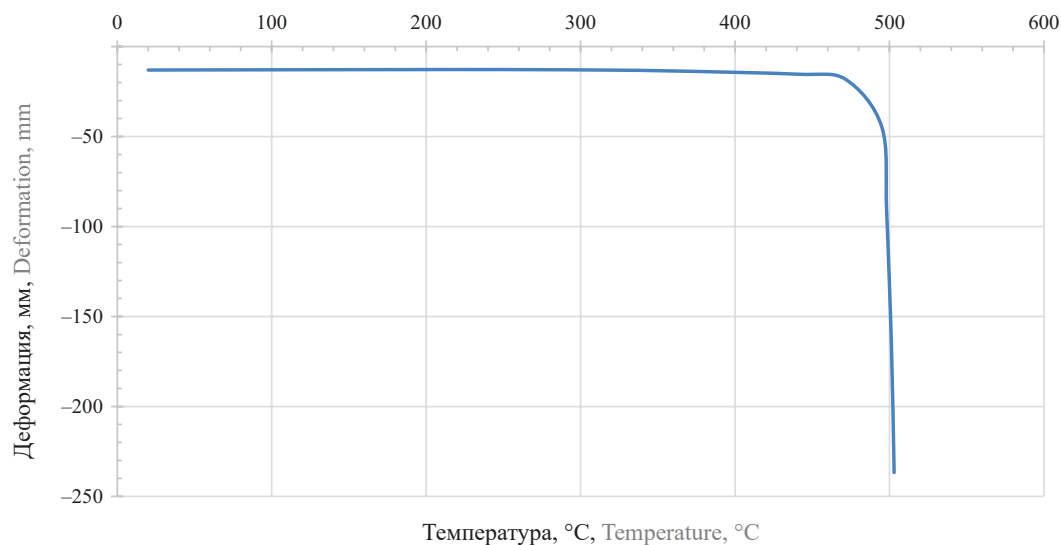


Рис. 8. Деформация балки в зависимости от температуры

Fig. 8. Temperature-dependent beam deformation

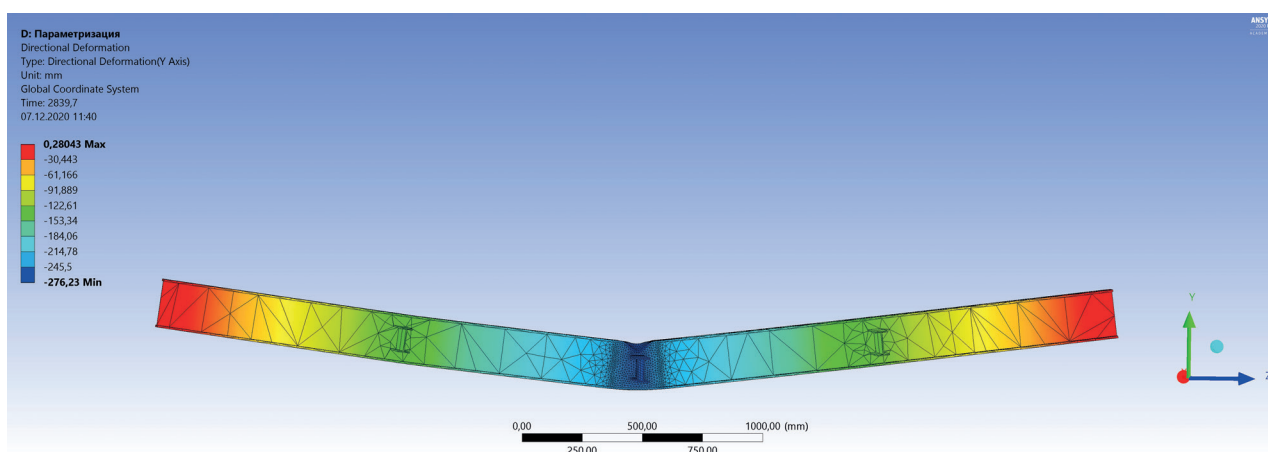
Рис. 9. Деформации по оси Y на 47-й минуте

Fig. 9. Deformation along the vertical axis at the 47th minute

полки главной балки и образования пластического шарнира. В нижней полке балки происходит рост напряжений до предельно возможных по временному сопротивлению. В результате происходит резкий прогиб балки при температуре 500 °C.

Дополнительные исследования анализа влияния площади сечения ВСК. В дополнении к основному расчету, где ВСК (I10) имела площадь сечения 9,5 см², проведен расчет для ВСК (I5) площадью сечения 3,12 см². При этом огневое воздействие и статическая нагрузка остаются такими же, как и для основного варианта с ВСК (I10). Сечение ВСК — составной двутавр. Ширина полки — 30 мм, высота сечения — 50 мм, толщина стенки и полоч — 3 мм.

Согласно выполненному расчету, прогиб балки в нижней полке на 60-й минуте составляет 20 мм; прогиб балки в нижней полке на 75-й минуте составляет 60 мм; прогиб балки в нижней полке на 85-й минуте составляет 556 мм. Вертикальные деформации по оси Y на 85-й минуте (5086 с) приведены на рис. 10.

Согласно результатам выполненного расчета, максимальная деформация 55,6 см больше пре-

дельно допустимой, которая равна 20 см, при этом максимальная скорость нарастания деформации составляет 333,8 см/мин, что больше предельно допустимой скорости нарастания деформации, равной 0,89 см/мин.

Деформация 20 см достигается на 80-й минуте, скорость нарастания деформации 0,89 см/мин — на 75-й минуте.

Время достижения предельного состояния по условию нарастания скорости деформации принято 75 мин.

В случае крепления ВСК с площадью сечения 3,12 см² время достижения предельного состояния составляет 75 мин, что менее 120 мин, т.е. предел огнестойкости, составляющий 120 мин, так же как и при креплении ВСК площадью сечения 9,5 см², не обеспечивается.

Предельное состояние в большей степени достигается за счет образования пластического шарнира и поворота сечения в левой и средней ВСК, а также за счет потери устойчивости верхней полки главной балки. В нижней полке балки происходит рост на-

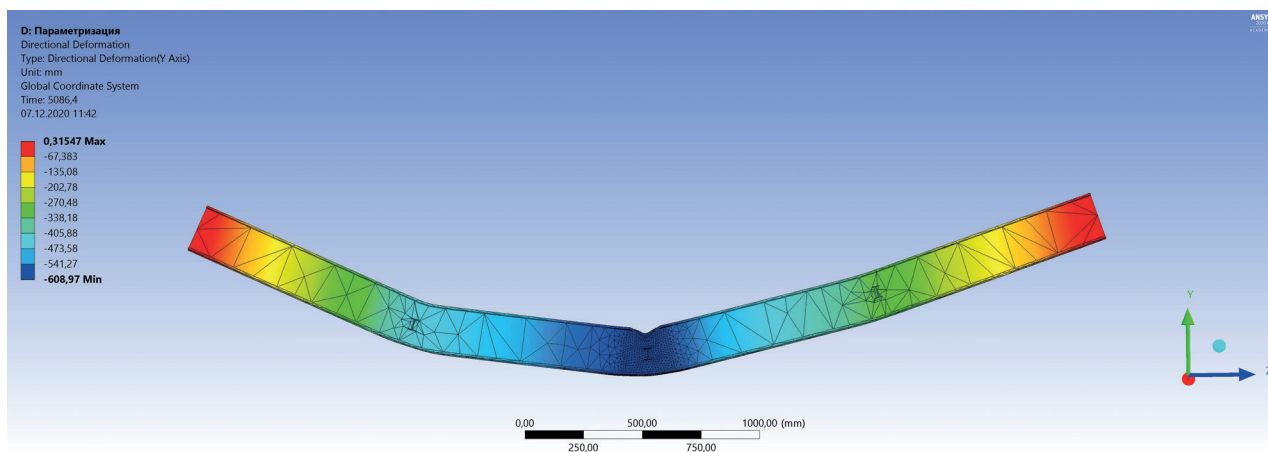
Рис. 10. Деформации по оси Y на 85-й минуте

Fig. 10. Deformation along the vertical axis at the 85th minute

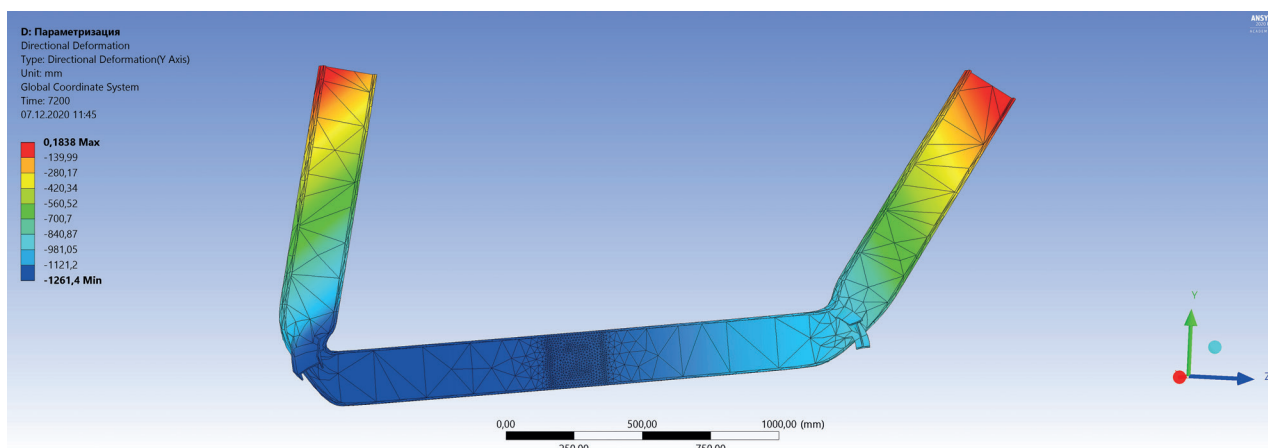


Рис. 11. Деформации по оси «Y» на 120-й минуте

Fig. 11. Deformation along the vertical axis at the 120th minute

пряжений до предельно возможных по временному сопротивлению. В результате происходит резкий прогиб балки при температуре 500 °C на 85-й минуте.

Дополнительные исследования анализа влияния места крепления ВСК. В дополнении к основному расчету, где главная балка имела три точки крепления ВСК (I10), выполнен расчет с отсутствием ВСК(I10) в средней части главной балки, где действуют максимальные напряжения.

Согласно результатам выполненного расчета, прогиб балки в нижней полке на 60-й минуте составляет 290 мм; прогиб балки в нижней полке на 120-й

минуте — 1128 мм. Вертикальные деформации по оси Y на 120-й минуте приведены на рис. 11.

Из результатов выполненного расчета следует, что максимальная деформация 112,8 см больше предельно допустимой, равной 20 см, при этом максимальная скорость нарастания деформации составляет 9,3 см/мин (на 65-й минуте), что больше предельно допустимой скорости нарастания деформации 0,89 см/мин.

Деформация 20 см достигается на 57-й минуте, скорость нарастания деформации 0,89 см/мин — на 49-й минуте.

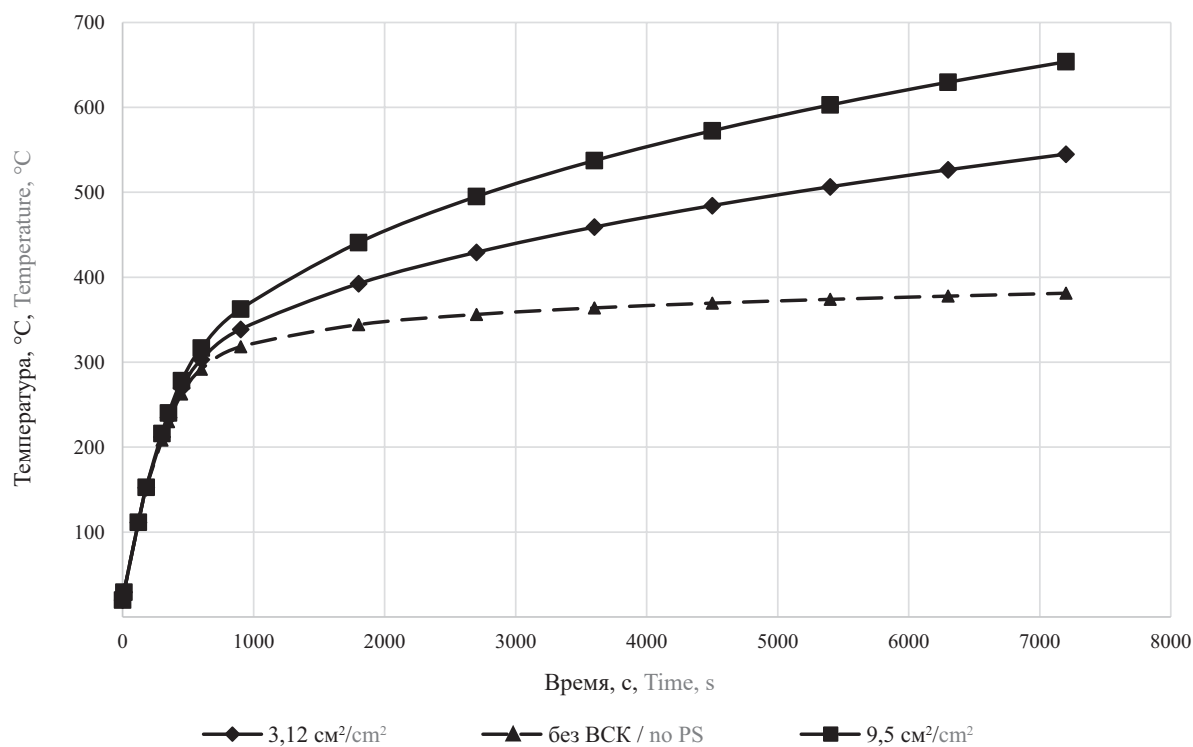


Рис. 12. Распределение температуры в середине нижней полки балки

Fig. 12. Temperature distribution over the middle part of the bottom flange

Таблица 3. Результаты анализа времени достижения предельного состояния для трех случаев крепления ВСК**Table 3.** The results of attaining time analysis for 3 cases of SSS attachment

Варианты крепления ВСК PS attachment options	Площадь ВСК, см ² PS area, cm ²	Количество ВСК, шт. Number of PSs, pcs	Время достижения предельного прогиба 20 см, мин Time to the maximal deflection of 20 cm, min	Время достижения предельной скорости 0,89 см/мин, мин Time to the maximal velocity of 0.89 cm/min, min	Принятое время достижения предельного состояния, мин Standard time to the limit state, min
1	9,5	3	47	44	44
2	3,12	3	80	75	75
3	9,5	2	57	49	49

Время достижения предельного состояния по условию нарастания скорости деформации принято 49 мин.

В случае отсутствия крепления ВСК в середине балки время достижения предельного состояния составляет 49 мин, что менее 120 мин, т.е. предел огнестойкости в 120 мин, так же как и при креплении ВСК в середине балки, не обеспечивается. Предельное состояние в большей степени достигается за счет образования пластического шарнира в местах крепления ВСК и поворота сечения. Нарастание прогиба балки начинается при температуре 522 °С.

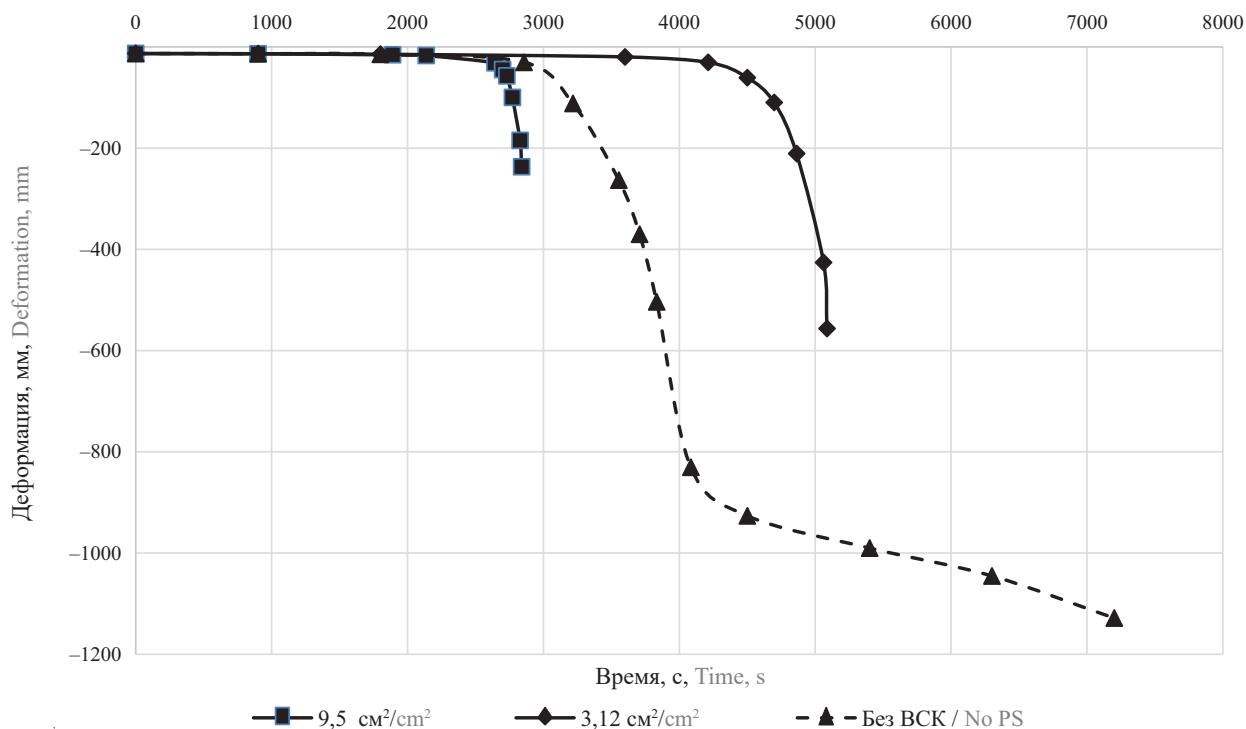
Сравнение результатов расчетов. Исследования влияния прогрева выполнялись для трех случаев крепления ВСК:

- три ВСК (I10) площадью сечения 9,5 см² (основной случай);
- три ВСК (I5) площадью сечения 3,12 см²;
- две ВСК (I10) площадью сечения 9,5 см². ВСК в середине балки отсутствует.

Анализ прогрева в середине нижней полки балки для трех случаев крепления ВСК показан на рис. 12.

Как видно из рис. 12, максимальная температура 654 °С достигается в нижней полке основной балки при креплении ВСК площадью сечения 9,5 см² (первый случай). Минимальная температура составляет 381 °С для случая отсутствия ВСК в середине балки (третий случай).

Нужно отметить, что для третьего случая температура двух крайних ВСК одинакова с темпера-

**Рис. 13.** Деформации в зависимости от времени**Fig. 13.** Time-deformation curve

турой тех же точек в первом случае и составляет 690 °С.

Во втором случае максимальная температура в нижней полке балки составляет 545 °С.

Анализ времени достижения предельного состояния в зависимости от случая крепления ВСК приведен в табл. 3. Деформации в зависимости от времени представлены на рис. 13.

Прогрев от ВСК оказывает влияние на время достижения конструкцией предельного состояния и соответственно на предел ее огнестойкости.

По условию достижения предельно допустимой скорости нарастания деформации снижение предела огнестойкости составляет:

- для ВСК площадью сечения 9,5 см² — 76 мин (со 120 до 44 мин);
- для ВСК площадью сечения 3,12 см² — 45 мин (со 120 до 75 мин);
- для случая отсутствия ВСК в середине балки, где действуют максимальные напряжения, — 71 мин (со 120 до 49 мин).

По сравнению с предельно допустимой деформацией 200 мм предельно допустимая скорость нарастания деформации достигается в среднем на 3...8 мин раньше.

Прогрев от ВСК с меньшей площадью сечения (3,12 см² вместо 9,5 см²) также оказывает влияние на время достижения конструкции предельного состояния и соответственно на предел огнестойкости. В случае уменьшения площади сечения ВСК с 9,5 до 3,12 см² увеличивается время прогрева до критических температур и соответственно увеличивается время достижения предельного состояния.

Несмотря на отсутствие ВСК в зонах с напряжением более 70 % от предела текучести (в середине балки) прогрев оказывает влияние на участки с напряжением менее 50 %. Например, в левой части крепления ВСК, где напряжение составляет примерно 100...114 МПа, пластические деформации начинают развиваться при температуре более 550 °С, так как предел текучести при данной температуре составляет 110 МПа. Соответственно основной причиной значительного прогиба, равного 1128 мм, для третьего случая является образование двух шарниров пластичности и поворот сечения главной балки в этих шарнирах.

Выводы

Рассмотрена существующая методика расчета огнестойкости стальных конструкций. В данной методике не учитывается возможность снижения предела огнестойкости от прогрева ВСК без огнезащиты.

Исследовано влияние прогрева от ВСК без огнезащиты на предел огнестойкости конструкций в огнезащите. В дополнении к международным исследованиям произведена оценка влияния прогрева в зависимости от площади сечения и места крепления ВСК.

Численное моделирование выявило, что во всех рассмотренных случаях прогрев от ВСК оказывает влияние на деформации главной балки даже при наличии огнезащиты на главной балке.

Рекомендация из международной практики наносить огнезащиту на ВСК длиной 450 мм при площади сечения ВСК более 3000 мм² нецелесообразна, так как в практике строительства встречаются сечения различной высоты. Так, для первого случая, где рассмотрена ВСК площадью сечения 950 мм², прогрев оказывает существенное влияние на предел огнестойкости и требует огнезащиты ВСК, даже если площадь сечения в данном случае менее 3000 мм².

Для дальнейшей проверки влияния ВСК без огнезащиты на время достижения предельного состояния стальной балки в огнезащите требуется проведение экспериментальных исследований.

Необходимы также дополнительные исследования для оценки влияния прогрева от ВСК на вертикальные конструкции в огнезащите, в том числе с учетом углеводородного режима пожара.

На основании выполненного исследования можно предложить следующие рекомендации:

- к существующей методике расчета огнестойкости и нормативным документам по пожарной безопасности добавить требование о проверке влияния прогрева от второстепенных стальных конструкций без огнезащиты на предел огнестойкости;
- в случае, если по результатам проверки прогрев влияет на предел огнестойкости, необходимо предусмотреть огнезащиту для ВСК;
- необходимо подбирать требуемую длину огнезащиты для ВСК.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Guidance on passive fire protection for process and storage plant and equipment. Energy Institute, 2017. 115 p.
2. Яковлев А.И. Расчет огнестойкости строительных конструкций. М. : Стройиздат, 1988. 144 с.
3. Ройтман В.М. Инженерные решения по оценке огнестойкости проектируемых и реконструируемых зданий. Ассоциация «Пожарная безопасность и наука», 2001. 382 с.

4. *Ройтман В.М.* Огнестойкость строительных материалов как базовая характеристика кинетической теории огнестойкости // *Пожары и чрезвычайные ситуации: предотвращение, ликвидация.* 2019. Вып. 1. С. 62–69.
5. *Ройтман В.М., Серков Б.Б., Приступнюк Д.Н.* Направления развития теории огнестойкости конструкций, зданий и сооружений с учетом комбинированных особых воздействий с участием пожара // *XXIX Международная научно-практическая конференция, посвященная 80-летию ФГБУ ВНИИПО МЧС России : в 2-х ч. Ч. 2: Горение и проблемы тушения пожаров : тез. докл. М. : ВНИИПО, 2017. С. 42–45. URL: <https://elibrary.ru/item.asp?id=29942736>*
6. *Ройтман В.М., Голованов В.И.* Необходимость технического регулирования огнестойкости зданий с учетом возможности комбинированных особых воздействий с участием пожара // *Пожарная безопасность/Fire Safety.* 2014. № 1. С. 86–93.
7. *Голованов В.И., Павлов В.В., Пехотилов А.В.* Оценка качества нанесения средств огнезащиты на стальные конструкции зданий и сооружений различного функционального назначения // *Пожарная безопасность/Fire Safety.* 2015. № 3. С. 74–82.
8. *Шебеко Ю.Н., Шебеко А.Ю., Зубань А.В.* Определение требуемой толщины вспучивающегося огнезащитного покрытия на стальных конструкциях для заданных пределов огнестойкости // *Пожарная безопасность/Fire Safety.* 2020. № 1. С. 26–29.
9. *Шебеко Ю.Н., Зубань А.В., Шебеко А.Ю.* Расчет фактического предела огнестойкости незащищенных стальных конструкций при различных температурных режимах пожара // *Пожаровзрывобезопасность/Fire and Explosion Safety.* 2019. Т. 28. № 6. С. 29–34. DOI: 10.18322/PVB.2019.28.06.29-34
10. *Перельмутер А.В.* Расчет огнестойкости стальных конструкций // *International Journal for Computational Civil and Structural Engineering/Международный журнал по расчету гражданских и строительных конструкций.* 2019. Т. 15. № 1. С. 110–118. DOI: 10.22337/2587-9618-2019-15-1-110-118 URL: <https://ijccse.iasv.ru/index.php/ijccse/article/view/195>
11. *Молчадский И.С.* Пожар в помещении. М. : ВНИИПО, 2005. 456 с.
12. *Amdahl J., Holmas T., Skallerud B.* Ultimate strength of structural members with attachments during accidental fires // *International Conference Response of Structures to Extreme Loading.* Toronto, Canada. 2003.
13. *Friebe M., Jang B.S., Jim Y.* A parametric study on the use of passive fire protection in FPSO topside module // *International Journal of Naval Architecture and Ocean Engineering.* 2014. Vol. 6. Pp. 826–839. DOI: 10.2478/IJNAOE-2013-0216
14. *Podolski D., Wang Y.-C., Yuan J.* Numerical investigation of intumescent ‘coatback’ on unprotected secondary beams // *Applications of Fire Engineering — Proceedings of the International Conference of Applications of Structural Fire Engineering, ASFE.* 2017. Pp. 161–170.
15. *Necip Onder Akinci, Krishna Parvathaneni, Abhimanyu Kumar, Hyun-Su Kim, Michael Stahl, Xiaowei Dai.* Advanced Fire Integrity Analysis and PFP Optimization Methods for Petrochemical Facilities // *21st Annual international Symposium October, Texas.* 2018.
16. *Munoz-Garcia E.* Analysis and design challenges and solutions of 3 sided passive fire protection PFP on steel beam decks for offshore installations // *Offshore Technology Conference Asia.* 2016. DOI: 10.4043/26623-MS
17. *Imran M., Liew M.S., Nasif M.S., Munoz Garcia E., Danyaro K.U., Niazi M.U.* Thermal and mechanical response of partially protected steel I-beams under fire // *MATEC Web of Conference.* 2018. Vol. 203. P. 06009. DOI: 10.1051/mateconf/201820306009
18. *Ботян С.С., Жамойдик С.М., Кудряшов В.А., Олесиук Н.М.* Прогрев стержневых стальных конструкций с частичной и полной огнезащитой наружной поверхности при огневом воздействии // *Вестник Университета гражданской защиты МЧС Беларуси.* 2020. Т. 4. № 1. С. 20–31. DOI: 10.33408/2519-237X.2020.4-1.20
19. *Пехотилов А.В.* Огнестойкость изгибаемых стальных конструкций : дис. ... канд. техн. наук. М., 2008. 198 с.
20. *Голованов В.И.* Прогнозирование огнестойкости стальных конструкций с огнезащитой : дис. ... д-ра техн. наук. М., 2008. 337 с.
21. *Wang W., Zhang L.* An approach for evaluating fire resistance of steel beams considering creep effect // *Procedia Engineering.* 2017. Vol. 210. Pp. 544–550. DOI: 10.1016/j.proeng.2017.11.112

22. Ишимов А.С., Барышников М.П., Чукин М.В. К вопросу выбора математической функции уравнения состояния для описания реологических свойств стали 20 в процессе горячей пластической деформации // Вестник Магнитогорского государственного технического университета им. Г.И. Носова. 2015. Вып. 1. С. 43–52. URL: <https://elibrary.ru/item.asp?id=23166465>

REFERENCES

1. *Guidance on passive fire protection for process and storage plant and equipment*. Energy Institute, 2017; 115.
2. Yakovlev A.I. *The calculation of fire resistance of steel structures*. Moscow, Stroyizdat Publ., 1988; 144. (rus).
3. Roytman V.M. *The engineering solutions for fire resistance evaluation of designed and reconstructed buildings*. Association “Fire safety and science”, 2001; 382. (rus).
4. Roytman V.M. Fire resistance of building material as a basic characteristic of fire resistance kinetic theory. *Pozhary i chrezvychaynye situatsii: predotvrashchenie, likvidatsiya/Fires and emergencies: prevention, elimination*, 2019; 1:62-69. (rus).
5. Roytman V.M., Serkov B.B., Pristupnyk D.N. A way forward of fire resistance theory development of structures, buildings and frame structures considering combining special loads together with fire. *XXIX International Scientific-Practical Conference, dedicated to 80th anniversary of FGBU VNIPO of EMERCOM of Russia : in 2 parts. Part 2: Combustion and problems of extinguishing fires : abstracts. Report*. Moscow, VNIPO, 2017; 42-45. URL: <https://elibrary.ru/item.asp?id=29942736> (rus).
6. Roytman V.M., Golovanov V.I. Need for technical regulation of the buildings fire resistance taking into account the possible combined hazardous fire exposure. *Pozharnaya bezopasnost'/Fire safety*. 2014; 1:86-93. (rus).
7. Golovanov V.I., Pavlov V.V., Pekhotikov A.V. Assessment of quality application of fire protection means on steel constructions of buildings and structures of various functional purposes. *Pozharnaya bezopasnost'/Fire safety*. 2015; 3:74-82. (rus).
8. Shebeko Yu.N., Shebeko A.Yu., Zuban A.V. Determination of required thicknesses of an intumescent fire redundant coating on steel structures for given fire resistance limits. *Pozharnaya bezopasnost'/Fire Safety*. 2020; 1:26-29. (rus).
9. Shebeko Yu.N., Zuban A.V., Shebeko A.Yu. An evaluation of an actual fire resistance limit of non-protected steel structures for different temperature regimes of fires. *Pozharovzryvbezopasnost'/Fire and Explosion Safety*. 2019; 28(6):29-34. DOI:10.18322/PVB.2019.28.06.29-34 (rus).
10. Perelmutter A.V. Fire design of steel structures. *International Journal for Computational Civil and Structural Engineering*. 2019; 15(1):110-118. DOI: 10.22337/2587-9618-2019-15-1-110-118 URL: <https://ijccse.iasv.ru/index.php/ijccse/article/view/195>
11. Molchadskiy I.S. *The fire in a room*. Moscow, VNIPO, 2005; 456. (rus).
12. Amdahl J., Holmas T., Skallerud B. Ultimate strength of structural members with attachments during accidental fires. *International Conference Response of Structures to Extreme Loading*. Toronto, Canada, 2003.
13. Friebe M., Jang B.S., Jim Y. A parametric study on the use of passive fire protection in FPSO topside module. *International Journal of Naval Architecture and Ocean Engineering*. 2014; 6:826-839. DOI: 10.2478/IJNAOE-2013-0216
14. Podolski D., Wang Y.-C., Yuan J. Numerical investigation of intumescent ‘coatback’ on unprotected secondary beams. *Applications of Fire Engineering — Proceedings of the International Conference of Applications of Structural Fire Engineering*, ASFE. 2017; 161-170.
15. Necip Onder Akinci, Krishna Parvathaneni, Abhimanyu Kumar, Hyun-Su Kim, Michael Stahl, Xiaowei Dai. Advanced fire integrity analysis and PFP optimization methods for petrochemical facilities. *21st Annual international Symposium October, Texas*. 2018.
16. Munoz-Garcia E. Analysis and design challenges and solutions of 3 sided passive fire protection PFP on steel beam decks for offshore installations. *Offshore Technology Conference Asia*. 2016. DOI: 10.4043/26623-MS
17. Imran M., Liew M.S., Nasif M.S., Munoz Garcia E., Danyaro K.U., Niazi M.U. Thermal and mechanical response of partially protected steel I-beams under fire. *MATEC Web of Conference*. 2018; 203:06009. DOI: 10.1051/mateconf/201820306009
18. Botyan S.S., Zhamoydik S.M., Kudryashov V.A., Olesiyuk N.M. Heating of rod steel structures with partial and full fire-protected external surface under fire exposure. *Journal of Civil Protection*. 2020; 4(1):20-31.

19. Pekhotikov A.V. *The fire resistance of bended steel structures : dissertation for Ph.D. in Engineering Science*. Moscow, 2008. 198 p. (rus).
20. Golovanov V.I. *The Forecasting of steel structures fire resistance : dissertation for Advanced Doctor in Engineering Science*. Moscow, 2008; 337. (rus).
21. Wang W., Zhang L. An approach for evaluating fire resistance of steel beams considering creep effect. *Procedia Engineering*. 2017; 210:544-550. DOI: 10.1016/j.proeng.2017.11.112
22. Ishimov A.S., Baryshnikov M.P., Chukin M.V. On the selection of a mathematical function of the equation of state for a description of rheological properties of steel 20 during hot plastic deformation. *Vestnik of G.I. Nosov Magnitogorsk State Technical University*. 2015; 1:43-52. URL: <https://elibrary.ru/item.asp?id=23166465> (rus).

Поступила 25.11.2020, после доработки 04.02.2021;

принята к публикации 17.03.2021

Received November 25, 2020; Received in revised form February 4, 2021;

Accepted March 17, 2021

Информация об авторах

ВОРОСИН Анатолий Олегович, главный инженер, Филиал Линде ГмбХ, г. Самара, Российская Федерация; магистрант, Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет, г. Москва, Российская Федерация; ORCID: 0000-0003-2514-9138; e-mail: vorosin@gmail.com

ПАРФЕНЕНКО Александр Павлович, канд. техн. наук, доцент кафедры комплексной безопасности в строительстве, заместитель директора Института комплексной безопасности в строительстве, Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет, г. Москва, Российская Федерация; РИНЦ ID: 800496; Scopus Author ID: 57214086032; ResearcherID: AAP-2933-2020; ORCID: 0000-0001-7490-8773; e-mail: parf01@inbox.ru

Information about the authors

Anatoliy O. VOROSIN, Chief Engineer, Branch of Linde GmbH, Samara, Russian Federation; Magistrate, National Research Moscow State University of Civil Engineering, Moscow, Russian Federation; ORCID: 0000-0003-2514-9138; e-mail: vorosin@gmail.com

Aleksander P. PARFENENKO, Cand. Sci. (Eng.), Associate Professor of Department of Integrated Safety in Civil Engineering, Deputy Head of Institute of Integrated Safety in Construction, Moscow State University of Civil Engineering (National Research University), Moscow, Russian Federation; ID RISC: 800496; Scopus Author ID: 57214086032; ResearcherID: AAP-2933-2020; ORCID: 0000-0001-7490-8773; e-mail: parf01@inbox.ru

Волновой алгоритм определения оптимального маршрута движения газодымозащитников в зданиях при пожарах и задымлениях

© Е.В. Степанов^{1✉}, Д.В. Тараканов², Н.Г. Топольский¹

¹Академия Государственной противопожарной службы Министерства Российской Федерации по делам гражданской обороны, чрезвычайным ситуациям и ликвидации последствий стихийных бедствий (Россия, 129366, г. Москва, ул. Бориса Галушкина, 4)

²Ивановская пожарно-спасательная академия Государственной противопожарной службы Министерства Российской Федерации по делам гражданской обороны, чрезвычайным ситуациям и ликвидации последствий стихийных бедствий (Россия, 153040, Ивановская область, г. Иваново, пр-т Строителей, 33)

АННОТАЦИЯ

Введение. Одной из основных задач информационно-аналитической поддержки газодымозащитников является маршрутизация их передвижения в здании. Технические возможности в виде развитых систем дистанционного мониторинга обеспечивают руководителя тушения пожара необходимой информацией о месте первоначального возникновения пожара, а существующий математический аппарат позволяет осуществить прогноз параметров его развития. Цель данной работы — разработка алгоритма определения оптимального маршрута движения газодымозащитников в здании для поддержки принятия управленческих решений на пожаре. Для достижения поставленной цели необходимо разработать теоретическую основу и произвести ее программную реализацию.

Теоретические основы. В работе для моделирования движения газодымозащитников в здании использована теория клеточных автоматов. Применен клеточный автомат с окрестностью Мура. Для мониторинга параметров пожара использованы дифференциальные уравнения Колмогорова.

Результаты и обсуждения. Для определения оптимального пути в здании разработан модифицированный волновой алгоритм. Использовано разработанное программное средство, позволяющее моделировать движение газодымозащитников. При выполнении математического моделирования применяются коэффициенты важности, учитывающие приоритетное значение параметров работы газодымозащитников при выполнении разных видов работ.

Выводы. Результаты исследования дают основания считать, что разработанный алгоритм позволяет выявить оптимальный путь, тем самым давая лицу, принимающему решение о направлении звеньев газодымозащитной службы к месту проведения работ, возможность обоснованного выбора места ввода сил и средств, а также маршрута их движения внутри здания.

Ключевые слова: оптимальный путь; клеточный автомат; информационное обеспечение; управление; мониторинг пожара

Для цитирования: Степанов Е.В., Тараканов Д.В., Топольский Н.Г. Волновой алгоритм определения оптимального маршрута движения газодымозащитников в зданиях при пожарах и задымлениях // Пожаровзрывобезопасность/Fire and Explosion Safety. 2021. Т. 30. № 3. С. 31–40. DOI: 10.22227/0869-7493.2021.30.03.31-40

✉ Степанов Егор Владимирович, e-mail: stepanov9619@mail.ru

The wave algorithm used to determine the optimal indoor route for smoke divers in case of fire and fumigation

© Egor V. Stepanov^{1✉}, Denis V. Tarakanov², Nikolay G. Topolskiy¹

¹The State Fire Academy of the Ministry of Russian Federation for Civil Defense, Emergencies and Elimination on Consequences of Natural Disasters (Borisa Galushkina St., 4, Moscow, 129366, Russian Federation)

²Ivanovo fire and rescue Academy of the Ministry of Russian Federation for Civil Defense, Emergencies and Elimination on Consequences of Natural Disasters (Stroiteley pr., 33, Ivanovo Region, Ivanovo, 153040, Russian Federation)

ABSTRACT

Introduction. One of the main objectives, pursued by the information analysis support extended to smoke divers, is the preparation of indoor routes. Technical capabilities, represented by advanced remote monitoring systems, provide a fire extinguishing manager with the necessary information about the point of fire origin and

mathematical tools allow to predict fire spreading characteristics. The goal of this work is to develop an algorithm for the preparation of an optimal indoor route for smoke divers to support management decisions in the event of fire. To achieve this goal, it is necessary to develop the theoretical framework and implement it in a software programme.

Theoretical foundations. The theory of cellular automata is employed in this paper to simulate the routes of smoke divers inside a building. A cellular automaton with a Moore neighborhood is applied. We use differential equations, similar to the Kolmogorov equations, to monitor the fire parameters.

Results and discussions. A modified wave algorithm was developed to determine the optimal indoor route. The software tool was applied to simulate the route of gas divers. Coefficients of importance were applied in the process of mathematical modeling; they took account of the prioritized work to be performed by smoke divers.

Conclusions. The results of the study suggest that the algorithm allows to identify the optimal itinerary, thereby enabling the decision maker, responsible for sending teams of smoke divers to the work performance location, to make a reasonable choice of the point of entry for the personnel and machinery, as well as their itinerary inside the building.

Keywords: optimal route; cellular automaton; information support; management; fire monitoring

For citation: Stepanov E.V., Tarakanov D.V., Topolskiy N.G. The wave algorithm used to determine the optimal indoor route for smoke divers in case of fire and fumigation. *Pozharovzryvobezopasnost/Fire and Explosion Safety*. 2021; 30(3):31-40. DOI: 10.22227/0869-7493.2021.30.03.31-40 (rus).

✉ Egor Vladimirovich Stepanov, e-mail: stepanov9619@mail.ru

Введение

Ежегодно прямой материальный ущерб от пожаров в Российской Федерации превышает миллиарды рублей, более 8 тыс. чел. погибают на пожарах [1]. Для устойчивого социально-экономического развития страны и минимизации потерь от пожаров осуществляется совершенствование информационного обеспечения служб экстренного реагирования России. Существующие системы дистанционного мониторинга при пожарах в зданиях позволяют в режиме реального времени получать информацию о текущих параметрах мониторинга. Функционально они подразделяются: на системы противопожарной защиты объекта, системы позиционирования здания и системы телеметрии пожарных. Однако специфика тушения пожара предусматривает необходимость принятия решений для управления по прогнозным значениям. Для реализации данной функции разрабатываются системы поддержки принятия решений, позволяющие осуществлять прогноз значений параметров управления [2–11]. Целью данной работы является разработка алгоритма определения оптимального маршрута движения газодымозащитников в здании для поддержки принятия управленческих решений на пожаре. Для достижения цели исследования необходимо:

- создать теоретическую основу, позволяющую моделировать параметры, влияющие на движение газодымозащитников в здании;
- разработать алгоритм определения оптимального маршрута в здании с учетом сложившейся обстановки на месте пожара;
- произвести программную реализацию с целью дальнейшего использования в системах поддержки принятия решений на пожаре.

Теоретическая часть

Модель клеточного автомата — это дискретная математическая модель, включающая в себя совокупность ячеек, каждая из которых на рассматриваемый дискретный момент времени может находиться в одном из многих состояний [12]. В работе для прогноза информационных ресурсов использована модель мониторинга пожара в здании [11], представляющая собой клеточный автомат. Данная модель предусматривает декомпозицию общей площади здания на зоны контроля, в которых осуществляется дистанционный мониторинг одновременно нескольких параметров пожара. Совокупность взаимодействующих зон и параметров мониторинга задана системой дифференциальных уравнений, аналогичной модели «гибели-размножения» как частного случая записи системы уравнений Колмогорова. Аналитическое решение относительно параметра мониторинга пожара p определяется по формулам [11]:

- начальная зона контроля:

$$\Delta p_0(\tau) = p_0(\tau) - p^0 = p^* [1 - \exp(-Z_0(\tau))]; \quad (1)$$

- смежная зона контроля:

$$\Delta p_j(\tau) = p_j(\tau) - p^0 = \frac{\sum_{i=1, \dots, s} n_{i,j} p_i(\tau)}{\sum_{i=1, \dots, s} n_{i,j}} \times \quad (2)$$

$$\times \left[1 - \exp \left(-Z_j(\tau) \sum_{i=1, \dots, s} n_{i,j} \right) \right];$$

где $p(\tau)$ — параметр мониторинга пожара;
 p^0 — начальное значение параметра мониторинга пожара;

p^* — пороговое значение параметра мониторинга пожара;

$n_{i,j}$ — коэффициент обмена между зонами контроля с номерами i и j ;

s — количество зон контроля в системе мониторинга;

Z_j — интенсивность динамики пожара мониторинга в зоне с номером j .

Моделирование динамики параметров пожара во всех зонах контроля описывается системой уравнений [11]:

$$\begin{cases} \frac{dp_0}{d\tau} = Z_0(\tau)p^* - Z_0(\tau)p_0; \\ \frac{dp_1}{d\tau} = n_{0,1}Z_1(\tau)p_0 - n_{0,1}Z_1(\tau)p_1; \\ \dots \\ \frac{dp_k}{d\tau} = n_{(k-1),k}Z_k(\tau)p_{k-1} - n_{(k-1),k}Z_k(\tau)p_k, \end{cases} \quad (3)$$

где p_j — значение параметра пожара в зоне контроля с номером j ;

τ — время.

Математические зависимости позволяют получить значения параметров пожара в каждой зоне контроля системы мониторинга для каждого дискретного момента времени. Для этого строится сетка клеточного автомата и при запуске алгоритма

расчета на момент времени τ последовательно определяется значение параметра пожара для клетки, начиная с номера 0 и до номера N , затем для момента времени $\tau + \Delta\tau$ по значениям параметров на момент времени τ определяют следующую группу значений и т.д. Работа клеточного автомата обеспечивает наполнение базы данных для дальнейшей оценки тактических возможностей газодымозащитников.

В исследовании [11] для определения возможных маршрутов использована сетевая модель здания. Пример результата оценки маршрутов представлен на рис. 1.

Однако сетевое представление здания имеет ряд недостатков, главным из которых является отсутствие возможности представления реального маршрута следования газодымозащитников при больших площадях отдельных помещений. Для решения данной проблемы разработана пространственная модель управления действиями поисково-спасательных подразделений при пожарах и задымлении на основе клеточного автомата [13]. На данном этапе исследования модель может быть применена для тех случаев, когда техническое оснащение газодымозащитников (использование тепловизоров) позволяет передвигаться в здании без использования специальных способов движения (правило левой или правой руки, алгоритмы «отсек» и «дверь» [14]).

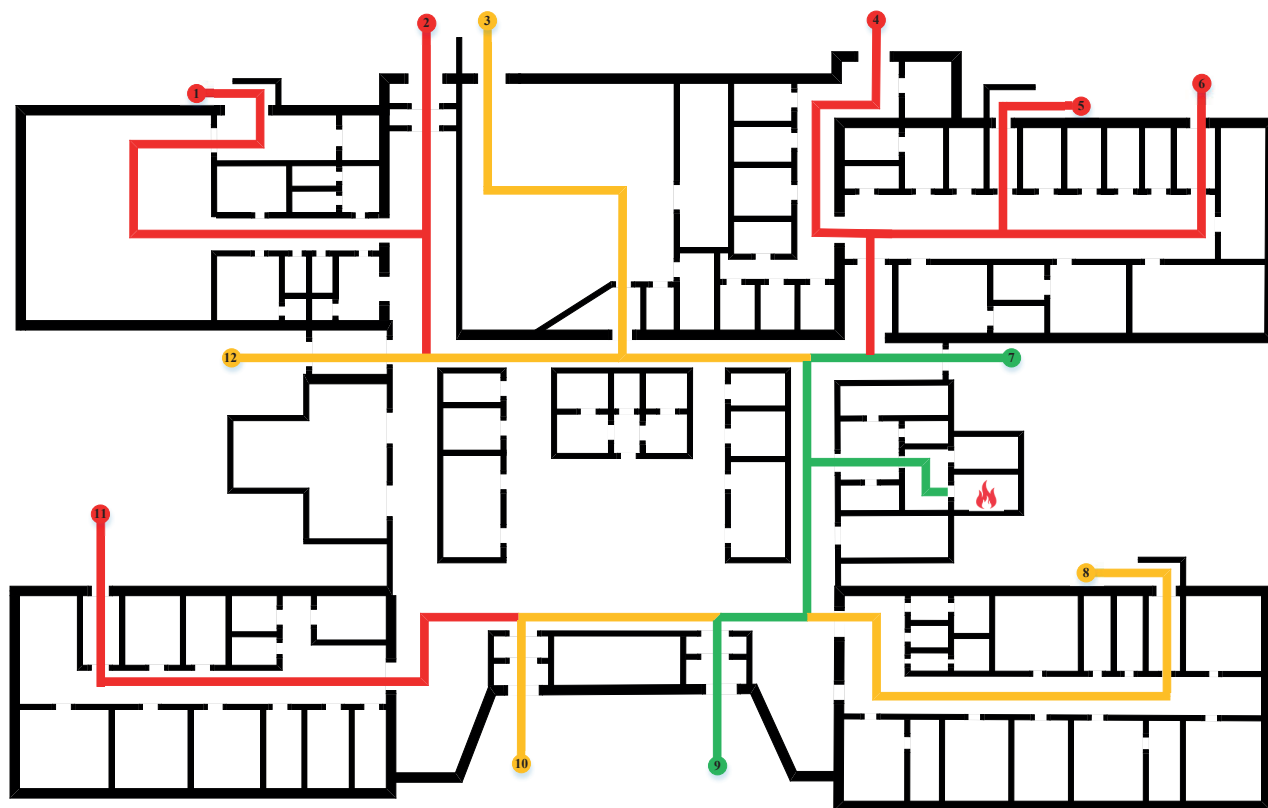


Рис. 1. Оценка маршрутов движения пожарных с применением сетевой модели здания [11]

Fig. 1. Firemen's routes assessed by the network model of the building [11]

Для определения прогнозных значений потребления дыхательных ресурсов и наполнения баз данных предельно допустимых и прогнозных значений использована дискретная модель [15] двух случайных величин, представленных переменными V — ресурс воздуха и T — ресурс времени. Атрибутами метода являются счетные множества:

$$\langle R, R_{an}, \langle V; T \rangle \rangle, \quad (4)$$

где R — множество элементарных работ с элементами $\langle R_1; R_2; \dots; R_n \rangle$;

R_{an} — множество случайных равномерно распределенных чисел, $R_{an} \in (0; 1)$;

$\langle V; T \rangle$ — множество дискретных значений исследуемых случайных величин.

Данный подход подтверждает актуальность его использования широким применением в теории управления [16–24].

Алгоритм нахождения оптимального пути

Для исключения указанных выше недостатков сетевого представления маршрута движения газодымозащитников в здании при определении оптимальности маршрута следования авторами статьи разработан модифицированный волновой алгоритм, выполнена его программная реализация.

Пример решения задачи. Планировка этажа в разработанном программном средстве представлена на рис. 2. При моделировании имитируется поступление сигнала от адресной системы пожарной сигнализации. Местоположение очага пожара для информативности отображается красной клеткой с желтой окрестностью. Местоположение пострадавшего оценивается по информации от систем позиционирования здания (при ее наличии) и также отображается на плане этажа.

Для определения прогнозных значений параметров пожара и наполнения базы данных строится

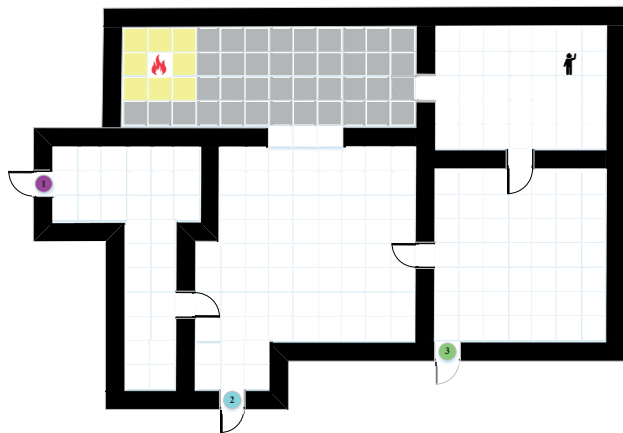


Рис. 2. Планировка этажа здания

Fig. 2. The floor plan of the building

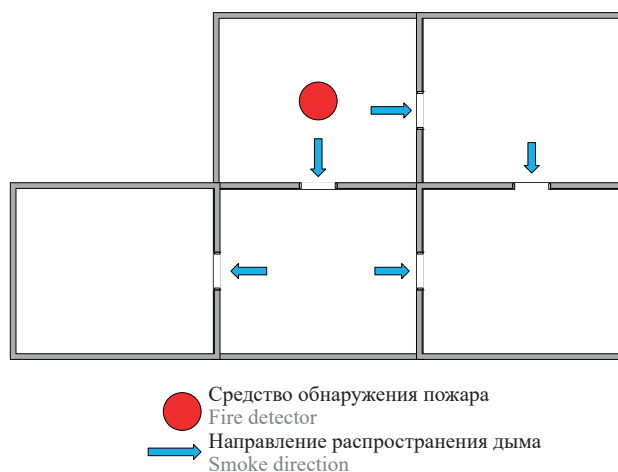


Рис. 3. Иллюстрация схемы для расчета

Fig. 3. The illustration of the computational pattern

клеточный автомат, отображающий планировку здания (рис. 3).

Полученные данные расчета заносятся в базу данных прогнозных значений и используются при дальнейшем анализе маршрута в программном средстве.

Вид выполняемых работ при моделировании устанавливается в автоматическом режиме. Перед началом расчета определяются коэффициенты важности для следующих показателей:

- протяженность маршрута движения (для клеточного автомата учитываются затраты на переход по различным направлениям);
- скорость движения звена газодымозащитной службы (ГДЗС) на маршруте (учитывается видимость на участке маршрута);
- потребление дыхательных ресурсов (учитывается вид выполняемых работ, что, в свою очередь, определяет допустимое время пребывания пожарных внутри здания).

После запуска алгоритма для каждого входа моделируется процесс распространения волны продвижения газодымозащитников. Для окрестности определяется показатель затрат в соответствии с коэффициентами важности. После расчета данного показателя для каждой клетки из окрестности результат сохраняется, и производится шаг. Затем для момента времени $\tau + \Delta t$ определяется следующая группа значений и т.д. (рис. 4).

На экране представляется многослойная структура. Расчет производится для каждого из входов на собственном слое для сохранения результатов и разделения значений при их последующем использовании. Алгоритм заканчивает свою циклическую работу по достижении необходимого объекта (пострадавший, очаг пожара, другое звено ГДЗС). При этом оптимальный путь рассчитывается из соображений минимизации затрат в соответствии с ко-

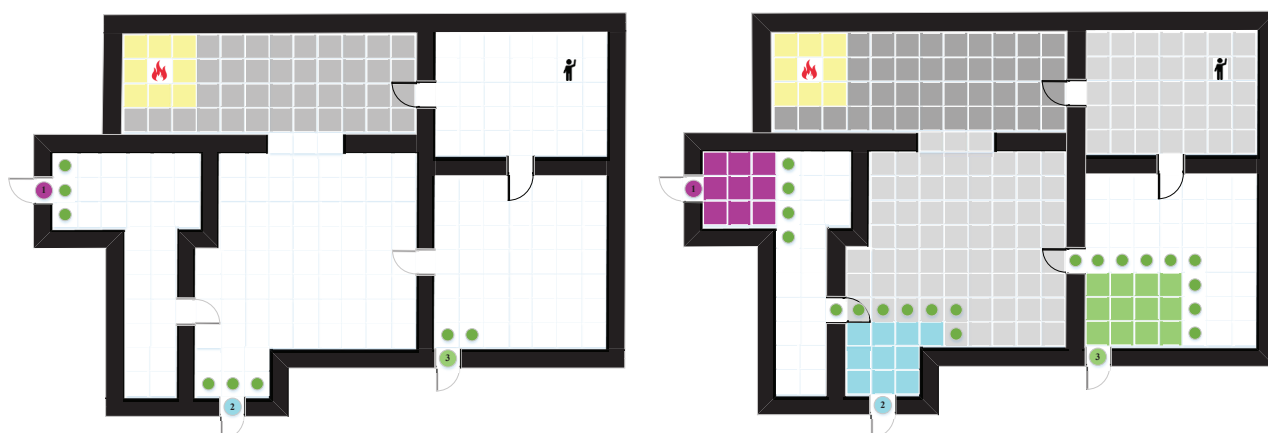


Рис. 4. Работа волнового алгоритма: *a* — определение окрестности; *b* — процесс распространения волны продвижения газодымозащитников

Fig. 4. The operation of the wave algorithm: *a* — neighborhood identification; *b* — wave propagation process

эффиентами важности. Для данного моделирования наилучшим входом для ввода сил и средств является вход 3. Наилучший маршрут представлен на рис. 5. Для случаев, когда дыхательных ресурсов недостаточно для достижения цели поиска, формируется соответствующий отчет.

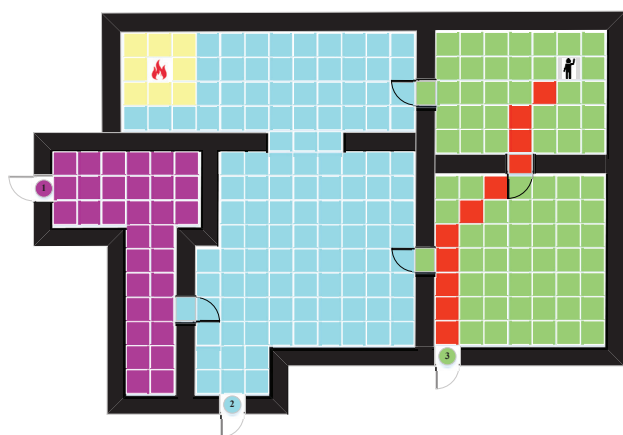


Рис. 5. Построение оптимального маршрута

Fig. 5. Optimal route generation

Для определения наилучшего маршрута выхода из здания производится расчет волновым алгоритмом из точки, в которой в данный момент находится газодымозащитник. При расчете учитывается дополнительная нагрузка в зависимости от состояния пострадавшего при его спасении. Графическое представление алгоритма определения оптимального маршрута представлено на рис. 7.

Для случаев, когда условия видимости и техническое оснащение не позволяют продвигаться по оптимальному маршруту (риск дезориентации), газодымозащитники продвигаются вдоль стен [14]. Для применения алгоритма в данной ситуации необходима его модификация. В данном случае расчет проводится для клеток, прилегающих к стенам. По итогу расчета формируется отчет о наилучшем месте ввода сил и средств в здание и выборе правой или левой руки обхода. Пример расчета для второго выхода представлен на рис. 8.

Дальнейшее исследование направлено на программную реализацию алгоритмов обхода помеще-

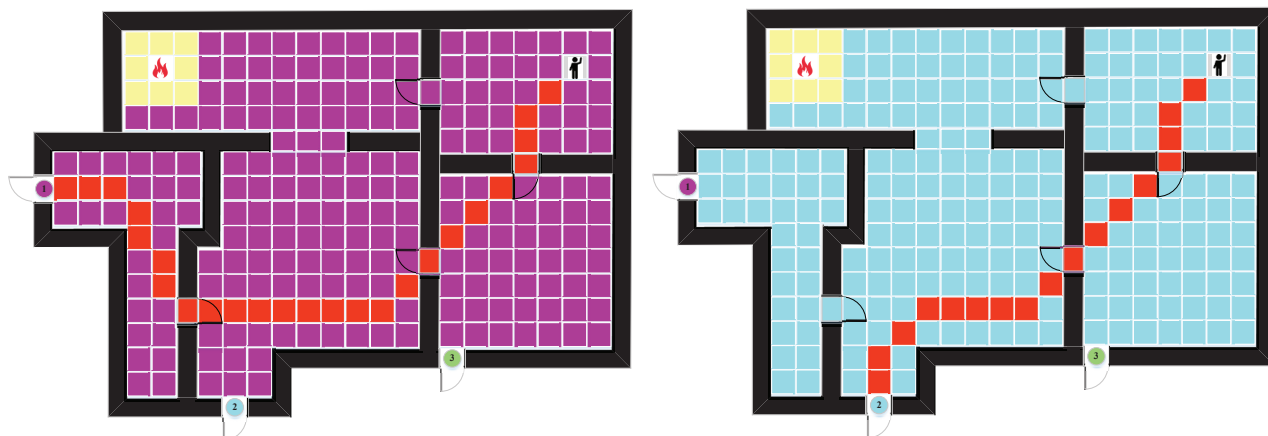


Рис. 6. Построение оптимального маршрута для разных входов в здание: *a* — вход 1; *b* — вход 2

Fig. 6. Generation of optimal routes for different entrances: *a* — Entrance 1; *b* — Entrance 2

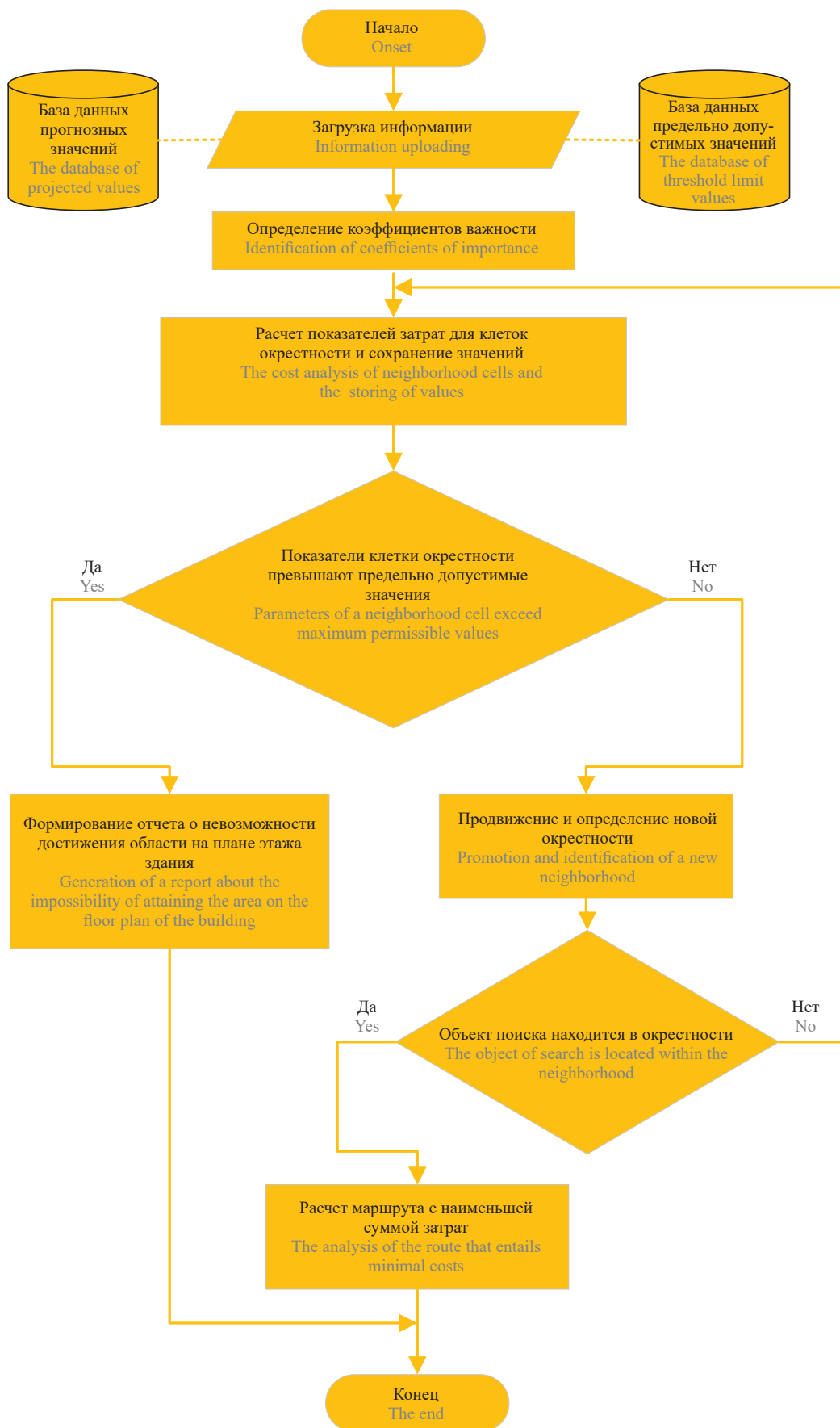


Рис. 7. Блок-схема алгоритма определения оптимального маршрута

Fig. 7. The block diagram of the optimal route generation algorithm

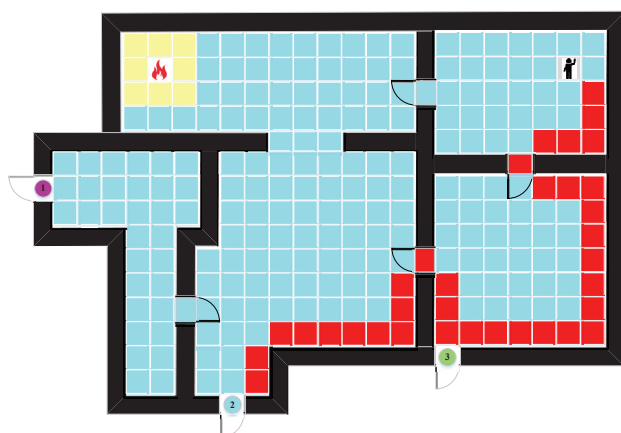


Рис. 8. Построение оптимального маршрута при использовании алгоритма обхода правой руки для входа 2

Fig. 8. The generation of the optimal route using the “right hand” bypass algorithm for entry 2

ний при проведении поиска пострадавших в случаях, когда их местонахождение неизвестно, что позволит произвести оценку тактических возможностей пожарно-спасательных подразделений, учитывая обстановку на месте пожара:

- определение возможной площади поиска группой разведки;
- определение необходимого количества групп разведки;
- определение необходимости применения технических средств, повышающих тактические возможности групп разведки (тепловизоры, дыхательные аппараты с условным временем защитного действия более 240 мин).

Результаты исследования также могут быть применены для обоснованного выбора дыхательных аппаратов, стоящих на вооружении пожарно-спасательных подразделений. Для этого необходимо провести моделирование, доказывающее, что выполне-

ние основной задачи группами разведки невозможно при обстановке, складывающейся на пожаре. В настоящее время выбор производится на основании соответствия здания или сооружения показателям, указанным в п. 13 Приказа МЧС РФ от 9 января 2013 г. № 3 «Об утверждении Правил проведения личным составом федеральной противопожарной службы Государственной противопожарной службы аварийно-спасательных работ при тушении пожаров с использованием средств индивидуальной защиты органов дыхания и зрения в непригодной для дыхания среде». Однако в нормативном акте представлены понятия (здания повышенной сложности, подвалы сложной планировки), не имеющие утвержденного терминологического значения, и отсутствуют критерии, по которым они могут быть идентифицированы. Лицо, принимающее решение по оснащению подразделений, принимает решение на основании личного опыта.

Выводы

Разработанный алгоритм повышает точность модели за счет частичного исключения субъективных факторов (построение маршрутов, приближенных к реальным при больших площадях отдельных помещений). Результаты исследования дают основания считать, что предлагаемое программное средство позволяет выявить оптимальный путь, тем самым давая лицу, принимающему решение о направлении звеньев ГДЗС к месту проведения работ, возможность обоснованного выбора места ввода сил и средств, а также маршрута их движения внутри здания. В дальнейшем планируется программная реализация алгоритмов обхода газодымозащитниками помещений здания с целью оценки их тактических возможностей.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Полехин П.В., Чебуханов М.А., Долаков Т.Б., Козлов А.А., Матюшин Ю.А., Фирсов А.Г. и др. Пожары и пожарная безопасность в 2019 году : статистический сборник. М. : ВНИИПО, 2020. С. 80.
2. Терещев В.В., Семенов А.О., Смирнов В.А., Тараканов Д.В. Анализ и поддержка решений при тушении крупных пожаров // Пожаровзрывобезопасность/Fire and Explosion Safety. 2010. Т. 19. № 9. С. 51–57. URL: <https://elibrary.ru/item.asp?id=16902937>.
3. Терещев 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. URL: <https://elibrary.ru/item.asp?id=18059941>.
4. Топольский Н.Г., Хабибуллин Р.Ш., Рыженко А.А., Бедило М.В. Адаптивная система поддержки деятельности центров управления в кризисных ситуациях : монография. М. : Академия ГПС МЧС России, 2014. 151 с.
5. Khorram-Manesh A., Berlin J., Carlström E. Two validated ways of improving the ability of decision-making in emergencies; results from a literature review // Bulletin of Emergency and Trauma. 2016. Vol. 4. Issue 4. Pp. 186–196.

6. *Minkin D.Yu., Sineshchuk Yu.I., Terekhin S.N., Yusherov K.S.* A method of constructing a structured database of the typical objects of protection on the basis of cluster analysis // *Journal of Theoretical and Applied Information Technology*. 2017. Vol. 95. Issue 20. Pp. 5331–5339.
7. *Lauras M., Benaben F., Truptil S., Charles A.* Event-cloud platform to support decision-making in emergency management // *Information Systems Frontiers*. 2015. Vol. 17. Issue 4. Pp. 857–869. DOI: 10.1007/s10796-013-9475-0
8. *Sanae Khali Issa, Abdellah Azmani, Benaissa Amami.* Vulnerability analysis of fire spreading in a building using fuzzy logic and its integration in a decision support system // *International Journal of Computer Applications*. 2013. Vol. 76. Issue 6. Pp. 48–53. DOI: 10.5120/13255-0732
9. *Hao Cheng, Hadjisophocleous G.V.* The modeling of fire spread in buildings by Bayesian network // *Fire Safety Journal*. 2009. Vol. 44. Issue 6. Pp. 901–908. DOI: 10.1016/j.firesaf.2009.05.005
10. *Mehdi Ben Lazreg, Jaziar Radianti, Ole-Christoffer Granmo.* Smart rescue: architecture for fire crisis assessment and prediction // *Proceedings of the 12 International Conference on Information Systems for Crisis Response and Management (ISCRAM 2015)* (Kristiansand, Norway, May 24–27, 2015). 7. URL: <http://iscram2015.uia.no/wp-content/uploads/2015/05/1> (дата обращения: 01.02.2021).
11. *Топольский Н.Г., Тарakanов Д.В., Баканов М.О.* Многокритериальная модель мониторинга пожара в здании для управления пожарно-спасательными подразделениями. Пожаро-взрывобезопасность/Fire and Explosion Safety. 2018. Vol. 27(5). Pp. 26–33. DOI: 10.18322/pvb.2018.27.5.26-33
12. *Малинецкий Г.Г., Степанов М.Е.* Применение клеточных автоматов для моделирования движения группы людей // *Журнал вычислительной математики и математической физики*. 2004. Т. 44. № 11. С. 2094–2098.
13. *Топольский Н.Г., Тарakanов Д.В., Степанов Е.В., Багажков И.В.* Пространственная модель управления действиями поисково-спасательных подразделений при пожарах и задымлении // *Современные проблемы гражданской защиты/Modern problems of civil protection*. 2020. Т. 36. № 3. С. 47–52. URL: <https://elibrary.ru/item.asp?id=43956593>.
14. *Кабелев Н.А.* Пожарная разведка: тактика, стратегия и культура. Екатеринбург : Калан, 2016. 348 с.
15. *Гринченко Б.Б.* Вероятностная оценка необходимого запаса воздуха в дыхательных аппаратах при работе на пожаре // *Технологии техносферной безопасности*. 2017. № 4 (74). С. 155–162. URL: <https://elibrary.ru/item.asp?id=32847853>
16. *Присадков В.И., Муслакова С.В., Хатунцева С.Ю., Костерин И.В., Фадеев В.Е., Шамаев А.М.* Расчетные оценки эффективности тушения пожара в очаге внутренним противопожарным водопроводом // *Пожарная безопасность/Fire Safety*. 2017. № 1. С. 49–53.
17. *Теребнев В.В.* Расчет параметров развития и тушения пожаров. Екатеринбург : Калан, 2011. 460 с.
18. *Lee E.W.M.* Application of artificial neural network to fire safety engineering // *Handbook on Decision Making. Intelligent Systems Reference Library / L.C. Jain, C.P. Lim (eds.). Berlin, Heidelberg : Springer, 2010. Vol. 4. Pp. 369–395. DOI: 10.1007/978-3-642-13639-9_15*
19. *Lee E.W.M., Lau P.C., Yuen K.K.Y.* Application of artificial neural network to building compartment design for fire safety // *Intelligent Data Engineering and Automated Learning – IDEAL 2006. Lecture Notes in Computer Science / Corchado E., Yin H., Botti V., Fyfe C. (eds.). Berlin, Heidelberg : Springer, 2006. Vol. 4224. Pp. 265–274. DOI: 10.1007/11875581_32*
20. *Mendonça D., Beroggi G.E.G., van Gent D., Wallace W.A.* Designing gaming simulations for the assessment of group decision support systems in emergency response // *Safety Science*. 2006. Vol. 44. Issue 6. Pp. 523–535. DOI: 10.1016/j.ssci.2005.12.006
21. *Joo-Young Lee, Joonhee Park, Huiju Park, Aitor Coca, Jung-Hyun Kim, Nigel A.S.T. et al.* What do firefighters desire from the next generation of personal protective equipment? Outcomes from an international survey // *Industrial Health*. 2015. Vol. 53. Issue 5. Pp. 434–444. DOI: 10.2486/indhealth.2015-0033
22. *Scholz M., Gordon D., Ramirez L., Sigg S., Dyrks T., Beigl M.* A concept for support of firefighter frontline communication // *Future Internet*. 2013. Vol. 5. Issue 2. Pp. 113–127. DOI: 10.3390/fi5020113
23. *Markus Scholz, Dawud Gordon, Leonardo Ramirez, Stephan Sigg, Tobias Dyrks, Michael Beigl.* A concept for support of firefighter frontline communication // *Future Internet*. 2013. Vol. 5. Issue 2. Pp. 113–127. DOI: 10.3390/fi5020113

24. Xing Zhi-xiang, Gao Wen-li, Zhao Xiao-fang, Zhu De-zhi. Design and implementation of city fire rescue decision support system // *Procedia Engineering*. 2013. Vol. 52. Pp. 483–488. DOI: 10.1016/j.proeng.2013.02.172.

REFERENCES

1. Polexin P.V., Chebuxanov M.A., Dolakov T.B., Kozlov A.A., Matyushin Yu.A., Firsov A.G. et al. *Fires and fire safety in 2019: A statistical compilation*. Moscow, VNIPO Publ., 2020; 80. (rus).
2. Terebnev V.V., Semenov A.O., Smirnov V.A., Tarakanov D.V. Analysis and support solutions that arise when putting out large fires. *Pozharovzryvbezopasnost/Fire and Explosion Safety*. 2010; 19(9):51-57. URL: <https://elibrary.ru/item.asp?id=16902937> (rus).
3. Terebnev V.V., Semenov A.O., Tarakanov D.V. Decision making theoretical basis of management on fire. *Pozharovzryvbezopasnost/Fire and Explosion Safety*. 2012; 21(10):14-17. URL: <https://elibrary.ru/item.asp?id=18059941> (rus).
4. Topolskiy N.G., Khabibulin R.Sh., Ryzhenko A.A., Bedilo M.V. *Adaptive system of support of activities of crisis management centers : monograph*. Moscow, State Fire Academy of Emercom of Russia Publ., Moscow, 2014; 151. (rus).
5. Khorram-Manesh A., Berlin J., Carlström E. Two validated ways of improving the ability of decision-making in emergencies; results from a literature review. *Bulletin of Emergency and Trauma*. 2016; 4(4):186-196.
6. Minkin D.Yu., Sineshchuk Yu.I., Terekhin S.N., Yusherov K.S. A method of constructing a structured database of the typical objects of protection on the basis of cluster analysis. *Journal of Theoretical and Applied Information Technology*. 2017; 95(20):5331-5339.
7. Lauras M., Benaben F., Truptil S., Charles A. Event-cloud platform to support decision-making in emergency management. *Information Systems Frontiers*. 2015; 17(4):857-869. DOI: 10.1007/s10796-013-9475-0
8. Sanae Khali Issa, Abdellah Azmani, Benaissa Amami. Vulnerability analysis of fire spreading in a building using fuzzy logic and its integration in a decision support system. *International Journal of Computer Applications*. 2013; 76(6):48-53. DOI: 10.5120/13255-0732
9. Hao Cheng, George V. Hadjisophocleous. The modeling of fire spread in buildings by Bayesian network. *Fire Safety Journal*. 2009; 44(6):901-908. DOI: 10.1016/j.firesaf.2009.05.005
10. Mehdi Ben Lazreg, Jaziar Radianti, Ole-Christoffer Granmo. Smart rescue: architecture for fire crisis assessment and prediction. *Proceedings of the 12th International Conference on Information Systems for Crisis Response and Management — ISCRAM 2015*. Kristiansand, Norway, May 24-27. 2015; 7. URL: <http://iscram2015.uia.no/wp-content/uploads/2015/05/10-1.pdf> (accessed: February 1, 2021).
11. Topolskiy N.G., Tarakanov D.V., Bakanov M.O. Multi-criteria model for monitoring of fire in the building for managing fire-rescue subdivisions. *Pozharovzryvbezopasnost/Fire and Explosion Safety*. 2018; 27(5):26-33. DOI: 10.18322/pvb.2018.27.5.26-33 (rus).
12. Malineczkij G.G., Stepancov M.E. Application of cellular automata for modeling the movement of a group of people. *Computational Mathematics and Mathematical Physics*. 2004; 44(11):2094-2098. (rus).
13. Topolskiy N.G., Tarakanov D.V., Stepanov E.V., Bagazhkov I.V. Spatial model for managing the actions of search and rescue units during fires and smoke. *Modern problems of civil protection*. 2020; 36(3):47-52. URL: <https://elibrary.ru/item.asp?id=43956593> (rus).
14. Kabelev N.A. *Fire intelligence: tactics, strategy, and culture*. Ekaterinburg, Kalan Publ., 2016; 348. (rus).
15. Grinchenko B.B. Probability estimation an required supply of air breathing apparatus at working on fire. *Technology of Technosphere Safety*. 2017; 4(74):155-162. URL: <https://elibrary.ru/item.asp?id=32847853> (rus).
16. Prisdakov V.I., Muslakova S.V., Hatuntseva S.Yu., Kosterin I.V., Fadeev V.E., Shamaev A.M. Design assessment of the efficiency of fire fighting in the seat by the in-building fire pipeline. *Pozharnaya bezopasnost/Fire Safety*. 2017; 1:49-53. (rus).
17. Terebnev V.V. *Calculation of fire development and extinguishing parameters. Methodology. Examples. Tasks*. Yekaterinburg, Kalan Publ., 2011; 460. (rus).
18. Lee E.W.M. Application of artificial neural network to fire safety engineering. *Handbook on Decision Making. Intelligent Systems Reference Library* ; L.C. Jain, C.P. Lim (eds.). Berlin, Heidelberg, Springer, 2010; 4:369-395. DOI: 10.1007/978-3-642-13639-9_15

19. Lee E.W.M., Lau P.C., Yuen K.K.Y. Application of artificial neural network to building compartment design for fire safety. *Intelligent Data Engineering and Automated Learning — IDEAL 2006. Lecture Notes in Computer Science*; E. Corchado, H. Yin, V. Botti, C. Fyfe (eds.). Berlin, Heidelberg, Springer, 2006; 4224:265-274. DOI: 10.1007/11875581_32
20. Mendonça D., Beroggi G.E.G., van Gent D., Wallace W.A. Designing gaming simulations for the assessment of group decision support systems in emergency response. *Safety Science*. 2006; 44(6):523-535. DOI: 10.1016/j.ssci.2005.12.006
21. Joo-Young Lee, Joonhee Park, Huiju Park, Aitor Coca, Jung-Hyun Kim, Nigel A.S.T. et al. What do firefighters desire from the next generation of personal protective equipment? Outcomes from an international survey. *Industrial Health*, 2015; 53(5):434-444. DOI: 10.2486indhealth.2015-0033
22. Scholz M., Gordon D., Ramirez L., Sigg S., Dyrks T., Beigl M. A concept for support of firefighter frontline communication. *Future Internet*. 2013; 5(2):113-127. DOI: 10.3390/fi5020113
23. Markus Scholz, Dawud Gordon, Leonardo Ramirez, Stephan Sigg, Tobias Dyrks, Michael Beigl. A concept for support of firefighter frontline communication. *Future Internet*. 2013; 5(2):113-127. DOI: 10.3390/fi5020113
24. Xing Zhi-xiang, Gao Wen-li, Zhao Xiao-fang, Zhu De-zhi. Design and implementation of city fire rescue decision support system. *Procedia Engineering*. 2013; 52:483-488. DOI: 10.1016/j.proeng.2013.02.172

Поступила 12.04.2020, после доработки 30.04.2021;

принята к публикации 14.05.2021

Received April 12, 2021; Received in revised form April 30, 2021;

Accepted May 14, 2021

Информация об авторах

СТЕПАНОВ Егор Владимирович, адъюнкт факультета подготовки научно-педагогических кадров, Академия Государственной противопожарной службы Министерства Российской Федерации по делам гражданской обороны, чрезвычайным ситуациям и ликвидации последствий стихийных бедствий, г. Москва, Российская Федерация; РИНЦ ID: 1001434; ORCID: 0000-0002-6185-4312; e-mail: stepanov9619@mail.ru

ТАРАКАНОВ Денис Вячеславович, д-р техн. наук, профессор кафедры пожарной тактики и основ аварийно-спасательных и других неотложных работ в составе учебно-научного комплекса «Пожаротушение», Ивановская пожарно-спасательная академия Государственной противопожарной службы Министерства Российской Федерации по делам гражданской обороны, чрезвычайным ситуациям и ликвидации последствий стихийных бедствий, г. Иваново, Российская Федерация; РИНЦ ID: 587331; ORCID: 0000-0002-5811-7397; e-mail: den-pgs@yandex.ru

ТОПОЛЬСКИЙ Николай Григорьевич, д-р техн. наук, профессор, заслуженный деятель науки РФ, профессор кафедры информационных технологий, Академия Государственной противопожарной службы Министерства Российской Федерации по делам гражданской обороны, чрезвычайным ситуациям и ликвидации последствий стихийных бедствий, г. Москва, Российская Федерация; РИНЦ ID: 114882; ORCID: 0000-0002-0921-4764; e-mail: ntopolskii@mail.ru

Information about the authors

Egor V. STEPANOV, Student of the Post-Graduate Course, the State Fire Academy of the Ministry of Russian Federation for Civil Defense, Emergencies and Elimination on Consequences of Natural Disasters, Moscow, Russian Federation; ID RISC: 1001434; ORCID: 0000-0002-6185-4312; e-mail: stepanov9619@mail.ru

Denis V. TARAKANOV, Dr. Sci. (Eng.), Professor of the Department of Fire Tactics and Fundamentals of Emergency Rescue and Other Urgent Work as Part of the Educational and Scientific Complex Fire Fighting, Ivanovo fire and rescue Academy of the Ministry of Russian Federation for Civil Defense, Emergencies and Elimination on Consequences of Natural Disasters, Ivanovo Region, Ivanovo, Russian Federation; ID RISC: 587331; ORCID: 0000-0002-5811-7397; e-mail: den-pgs@yandex.ru

Nikolay G. TOPOLYSKIY, Dr. Sci. (Eng.), Professor, Professor of the Department of Information Technology, the State Fire Academy of the Ministry of Russian Federation for Civil Defense, Emergencies and Elimination on Consequences of Natural Disasters, Moscow, Russian Federation; ID RISC: 114882; ORCID: 0000-0002-0921-4764; e-mail: ntopolskii@mail.ru

Теплые полы как причина возникновения пожаров

© Г.В. Плотникова¹✉, К.Л. Кузнецов^{2,3}, С.С. Тимофеева³, Р.О. Морозов², А.А. Шеков¹

¹ Восточно-Сибирский институт Министерства внутренних дел Российской Федерации (Россия, 664074, Иркутская область, г. Иркутск, ул. Лермонтова, 110)

² Судебно-экспертное учреждение Федеральной противопожарной службы «Испытательная пожарная лаборатория» по Иркутской области (Россия, 664009, Иркутская область, г. Иркутск, ул. Култукская, 10)

³ Иркутский национальный исследовательский технический университет (Россия, 664074, Иркутская область, г. Иркутск, ул. Лермонтова, 83)

АННОТАЦИЯ

Введение. Актуальность темы, отраженной в статье, обусловлена тем, что современные отопительные системы, такие как теплые полы, несмотря на улучшение их конструкций, остаются потенциальными источниками возникновения пожаров. Исходя из актуальности выбранной темы статьи, целями исследования явились установление причин возникновения пожаров при эксплуатации современных систем отопления «Теплые полы»; анализ и обобщение заключений пожарно-технических экспертов по пожарам, возникшим из-за эксплуатации рассматриваемых отопительных установок.

Материалы и методы. Для оценки зажигательной способности инфракрасного пленочного теплого пола был проведен экспертный эксперимент, в ходе которого в нормальных условиях окружающей среды, при комнатной температуре был смоделирован участок напольного покрытия.

Результаты и их обсуждение. Проведенный эксперимент показал, что наиболее опасным является накрывание теплого пола материалом, способным к накоплению теплоты, при этом локальность данного воздействия практически исключает возможность отключения установки от командного сигнала термодатчика. При разборе конструкций было установлено, что непосредственно в зоне максимальных температур наблюдается оплавление фольгированного теплоизолятора. За 7 ч работы температура поднялась свыше 120 °С, после чего начал ощущаться специфический запах продуктов термического разложения синтетического изделия.

Выводы. Несмотря на все особенности современных систем «Теплые полы», их автоматизацию и модификацию, они остаются потенциально пожароопасными. Пожары современных отопительных систем «Теплые полы» могут возникнуть как в результате нарушения правил противопожарного режима при несоблюдении требований по эксплуатации отопительных приборов, так и в результате нештатного повышения температуры нагретых пленочных нагревателей, находящихся под напольными покрытиями.

Ключевые слова: отопительная система; пожарная опасность; нагревательный электрический кабель; пленочный электронагреватель; графитовая решётка; экспертный эксперимент; нормативные требования; терморегулятор

Для цитирования: Плотникова Г.В., Кузнецов К.Л., Тимофеева С.С., Морозов Р.О., Шеков А.А. Теплые полы как причина возникновения пожаров // Пожаровзрывобезопасность/Fire and Explosion Safety. 2021. Т. 30. № 3. С. 41–53. DOI: 10.22227/0869-7493.2021.30.03.41-53

✉ Плотникова Галина Викторовна, e-mail: plotnikovagv@mail.ru

Underfloor heating as a cause of fire

© Galina V. Plotnikova¹✉, Konstantin L. Kuznetsov^{2,3}, Svetlana S. Timofeeva³, Ruslan O. Morozov², Anatoliy A. Shekov¹

¹ Eastern-Siberian Institute of the Ministry of Internal Affairs of the Russian Federation (Lermontova St., 110, Irkutsk Region, Irkutsk, 664074, Russian Federation)

² Judicial and Expert Establishment Fire-Fighting Service “Testing Fire Laboratory” across the Irkutsk Region (Kultukskaya St., 10, Irkutsk Region, Irkutsk, 664009, Russian Federation)

³ Irkutsk National Research Technical University (Lermontov St., 83, Irkutsk Region, Irkutsk, 664074, Russian Federation)

ABSTRACT

Introduction. The relevance of the topic, addressed in the article, is backed by the fact that modern heating systems, such as the underfloor heating, remain potential sources of fire, despite the improvement in their designs. The purpose of the study is to identify the causes of fires that occur in the process of operation of

modern heating systems “Underfloor Heating”; to analyze and generalize the conclusions made by the fire safety experts in respect of the heating systems analyzed in the article.

Materials and methods. To assess the flammability of the infrared film underfloor heating, an experiment was conducted by the experts: the process of underfloor heating was simulated under normal environmental conditions at room temperature.

Results and discussion. The experiment has shown that the floor covering, made of the material capable of accumulating heat, is the most dangerous one, although its small area prevents its disconnection from the thermal sensor. When dismantling the construction, the co-authors found out that the foil insulator had been melting in the area of maximal temperatures. Over the course of seven hours of operation, the temperature exceeded 120 °C, and after that the odor of products of thermal decomposition of a synthetic product appeared.

Conclusions. Despite all the features of advanced underfloor heating systems, their automated operation and transformation, they remain potentially flammable. Modern underfloor heating systems can take fire both as a result of violation of the fire precautions in case of non-compliance with the requirements for the operation of heating devices, and as a result of overheated film heaters located under the floor covering.

Keywords: heating system; fire hazard; heating electric cable; film electric heater; graphite grid; experiment conducted by a team of experts; regulatory requirements; temperature controller

For citation: Plotnikova G.V., Kuznetsov K.L., Timofeeva S.S., Morozov R.O., Shekov A.A. Underfloor heating as a cause of fire. *Pozharovzryvobezopasnost/Fire and Explosion Safety*. 2021; 30(3):41-53. DOI: 10.22227/0869-7493.2021.30.03.41-53 (rus).

✉ Galina Viktorovna Plotnikova, e-mail: plotnikovagv@mail.ru

Введение

В соответствии со статистическими данными в России в среднем за год случается около 150 тыс. пожаров, при которых погибает около 8 тыс. чел., количество травмированных достигает 10 тыс. чел., ежедневный материальный ущерб составляет около 33 млн руб. [1–2].

Пожар, представляющий собой неконтролируемое горение, причиняет материальный ущерб, вред жизни и здоровью граждан, интересам общества и государства. Отопительные системы, применяемые для обогрева жилья, достаточно часто являются причиной пожара. Лидирующее место занимает традиционное для России печное отопление [3–9]. Проблема обеспечения пожарной безопасности от внутридомового отопления остается актуальной и до настоящего времени нерешенной. Большинство производителей считает, что пожарная опасность современных систем отопления снижена практически до нуля, так как системы снабжены автоматическими выключателями, датчиками контроля температуры, а трубы и другие элементы конструкции выполняются в основном из негорючих материалов высокого качества. В то же время ежегодно происходят пожары, уничтожается имущество, страдают люди, и причиной могут явиться и являются отопительные установки, в том числе теплые полы. Актуальность темы, отраженной в статье, обусловлена тем, что современные отопительные системы все чаще применяются в жилых домах, офисных помещениях, дачах и других помещениях, в то же время, несмотря на улучшение их конструкций, они остаются потенциальными источниками возникновения пожаров.

К современным системам отопления относят теплые полы, которые широко применяются для

обогрева помещений. Существуют две разновидности этой системы: водяные и электрические, которые отличаются друг от друга конструктивно [10–13]. При использовании в качестве теплоносителя нагревательного электрического кабеля, находящегося под несколькими слоями изоляции, электрические теплые полы могут быть конвекционными и инфракрасными. В конвекционных полах нагрев происходит за счет непосредственного контакта электрического кабеля и пола, а в случае инфракрасных полов обогрев происходит за счет теплового излучения [14–20].

Одним из основных вопросов, который возникает и волнует желающих установить данную систему отопления, является вопрос о пожарной опасности теплых полов.

Многие производители и специалисты считают, что этот достаточно новый способ отопления зданий не более пожароопасен, чем обычная электропроводка. По их мнению, так как нагревательные кабели зарекомендовали себя как надежные и безопасные в эксплуатации, следовательно, теплые полы тоже безопасны (рис. 1). Инфракрасные полы имеют целый ряд преимуществ, к которым относятся возможность осуществлять локальный обогрев, устойчивость перед низкими температурами, сохранение работоспособности даже при длительном отсутствии владельцев в зимний период.

Существует мнение, что сам по себе теплый пол не является причиной возникновения возгораний, а если говорить о его пожарной безопасности, то особое внимание следует уделять исправности электропроводки и возникновению дополнительной нагрузки на нее, которая появляется при подключении электрической системы обогрева. Принято считать, что риск использования теплых полов заключается

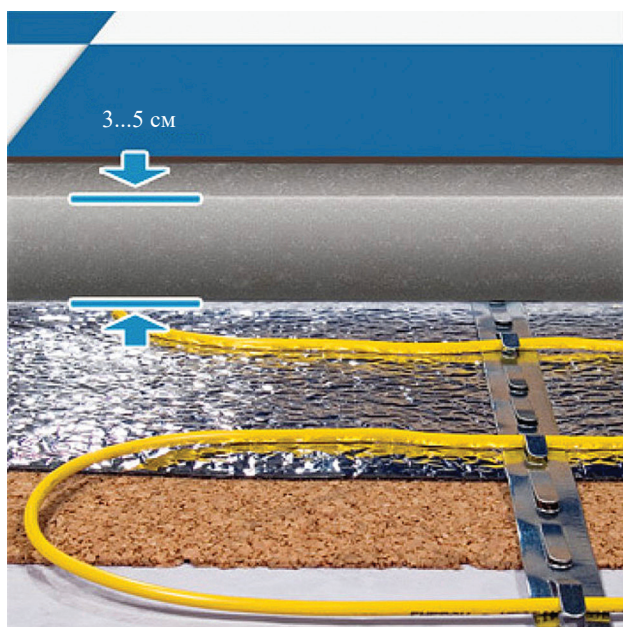


Рис. 1. Нагревательные кабели теплых полов
Fig. 1. Heating cables for underfloor heating

в системе обогрева, вмонтированной в пол, и проявляется в виде поражения человека электрическим током. Поэтому, чтобы обеспечить безопасность таких полов, необходимо выполнить их заземление. Возгорание же возможно только в случае неправильного монтажа системы или ее эксплуатации.

Разновидностью системы «Теплые полы» является пленочный электронагреватель (ПЛЭН). Одним из достоинств такого нагревателя является отсутствие жидкого теплоносителя [16–17]. Следовательно, отсутствует необходимость установки других сложных систем, исключаются всевозможные протечки, замерзание жидкости. По мнению авторов [18–20], пленочный нагреватель можно уложить по всей поверхности основания помещения, накрыв сверху ламинатом или любым другим видом покрытия. Нагревательным элементом является графитовая решетка, которая впаяна в плот-

ную пленку (рис. 2). По мнению разработчиков пленка, не только гибкая и не боится высоких нагрузок, но и абсолютно водонепроницаема, и ее можно смело использовать в ванной или бассейне, кроме того, она не воспламеняется.

Пленочные инфракрасные полы считаются пожаробезопасными, их можно устанавливать как на горизонтальные, так и на вертикальные поверхности, а в случае необходимости — и под углом. Нагрев происходит равномерно, что является преимуществом перед другими видами теплого пола.

Пленочный пол достаточно прост в установке, он легко поддается разборке. Разновидностью такого рода пленок является нагревательная инфракрасная пленка MARPE, в качестве нагревательного элемента в ней применяется карбоновая паста с добавлением углеродных трубок (которые в рекламах называют нанотрубками), задачей которых является обеспечение равномерного нагрева пола. Кроме нагрева, углеродные трубки служат для повышения прочности на изгиб и излом. Полученные таким образом карбоновые полосы имеют множество мелких отверстий, которые заполняются клеевым составом, за счет этого повышается прочность (рис. 3).

Выполненные одним из пользователей экспериментальные исследования¹ показали, что, если нагревать пленку с помощью электрического утюга, подошва которого нагрета до 140 °С, в течение 5 мин, то в результате пленка слегка коробится, и даже при росте температуры подошвы утюга до 160 °С возгорания не происходит (рис. 4).

При нагревании пленки с помощью паяльника, жало которого было нагрето до 200 °С, и при осуществлении контактного взаимодействия с пленкой произошло только прожигание пленки насквозь без последующего возгорания (рис. 5).

¹ STEM. Экспертиза: Испытываем инфракрасную пленку утюгом и паяльником. Пожаробезопасность. URL: <https://www.youtube.com/watch?v=1y-JkGIdjg> (дата обращения: октябрь 2020).

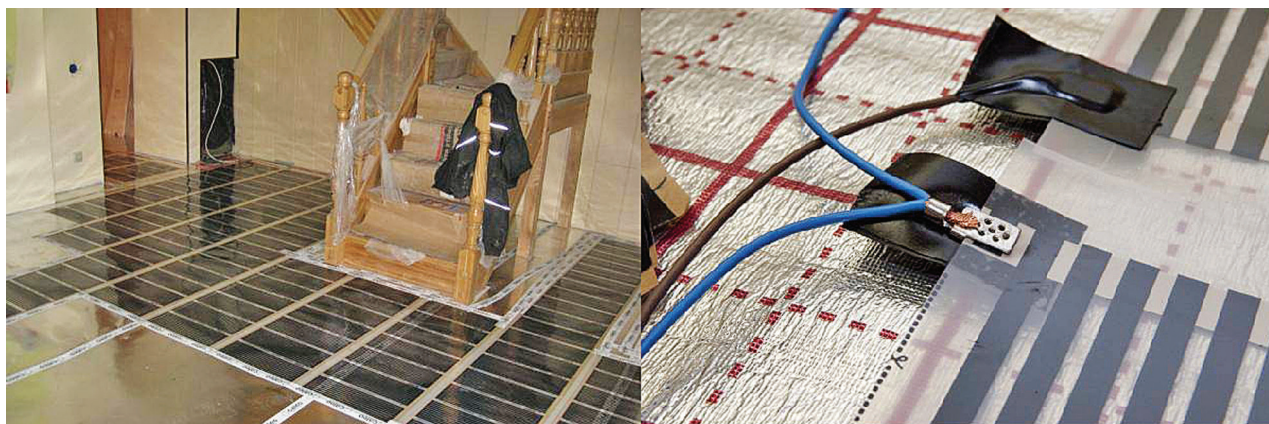


Рис. 2. Инфракрасная пленка теплых полов
Fig. 2. The infrared film of the underfloor heating



Рис. 3. Нагревательная инфракрасная пленка MARPE
Fig. 3. MARPE infrared film

По результатам этого эксперимента авторами был сделан вывод, что исследуемая инфракрасная пленка не является пожароопасной. По мнению экспериментаторов, представленные результаты показывают, что даже при температуре 200 °С (температуре, при которой происходит воспламенение разных видов материалов и изделий) и точечном источнике зажигания пожара не возникает. Пленка может из-

рядно покоробиться, но искры не возникают. Этими результатами авторами данного исследования было опровергнуто мнение, что при перегреве инфракрасная пленка может воспламениться.

В данном случае действие источника зажигания носит точечный характер, и воздействие его на пленку — непродолжительное. В результате не происходит аккумуляции тепла, поэтому делать выводы о невозможности возгорания было преждевременно.

В то же время практика исследований, выполненных при производстве пожарно-технических экспертиз, показывает, что причиной возникновения пожаров могут быть и отопительные системы «Теплые полы». В статье приведены только несколько примеров, хотя их значительно больше.

Например, пожар двухэтажного дома возник на балконе, на полу. Причиной возникновения пожара явился аварийный режим работы электрической системы «Теплые полы», а именно короткое замыкание² (рис. 6). По мнению дознавателя, при при-

² В новом жилом доме на Соловьиной загорелся теплый пол. URL: https://k1news.ru/news/incidents/v-novom-zhilom-dome-na-solovinoi-zagorelsya-teplyy-pol-/?sphrase_id=50837020 (дата обращения: 27.05.2021).

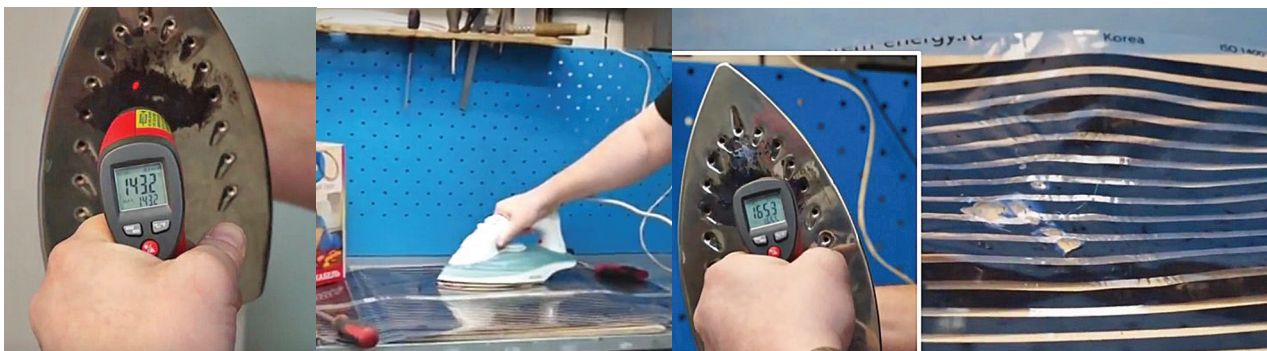


Рис. 4. Результат исследования инфракрасной пленки ПЛЭН
Fig. 4. The result of the study of the PL infrared film

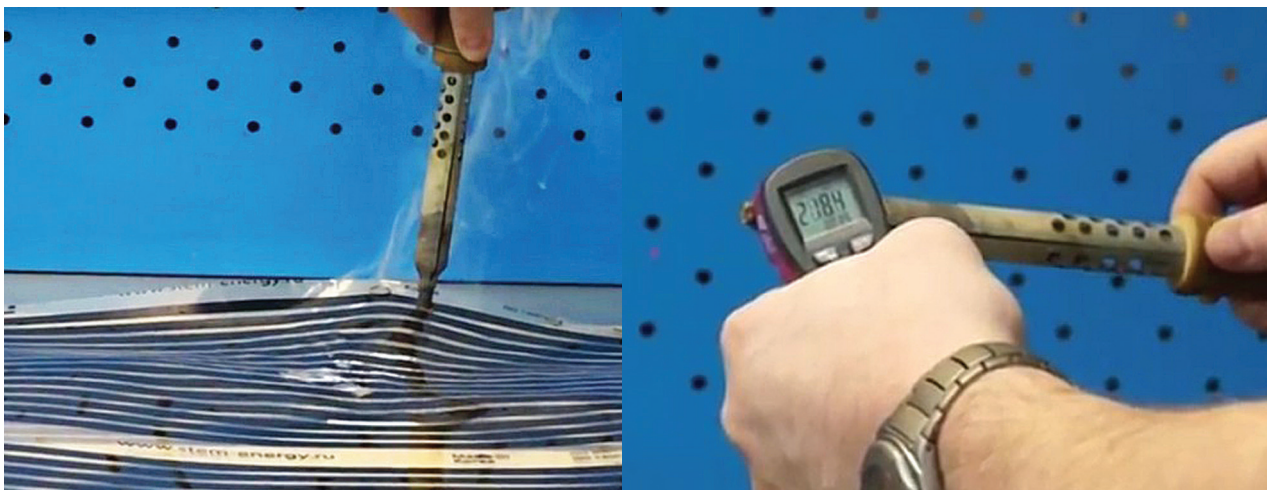


Рис. 5. Результат взаимодействия жала паяльника с пленкой
Fig. 5. The result of interaction between the soldering tip and the film

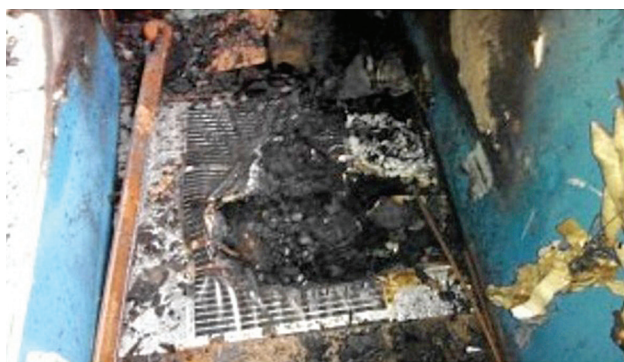


Рис. 6. Результат взаимодействия жала паяльника с пленкой
Fig. 6. The result of interaction between the soldering tip and the film

менении данных пленочных инфракрасных полов в сочетании с горючим покрытием — использовался ламинат — в результате аварийной работы этих полов произошло воспламенение горючих материалов с очень большим выделением дыма.

В коттедже, который был оборудован системой обогрева «Теплый пол», произошел пожар в результате сбоя в работе системы отопления и воспламенения изоляции электропроводки. Как следствие, загорелся пол, который представлял собой «сэндвич», состоящий из деревянных элементов, утеплителя и фольги. Основная версия возникновения пожара — аварийный режим работы электропроводки (рис. 7).

В большинстве проанализированных заключений экспертов по пожарам, связанным с теплыми полами, причиной возникновения пожара является аварийный режим работы электросети.

К недостаткам системы «Теплые полы» можно отнести потенциальную пожарную опасность, которая характерна для любых электроустановок. Теплый пол является непрерывной сетью, и повреждение одного участка автоматически может привести к неработоспособности других.

Исходя из актуальности выбранной темы, целью исследования, результаты которого представлены в статье, явилось выявление причин возникновения пожаров при эксплуатации современных систем отопления «Теплые полы» с пленочным электронагревателем.

Для достижения поставленных целей были решены следующие задачи:

- рассмотрены виды современных систем отопления «Теплые полы»;
- проанализированы особенности конструкции и пожарной опасности современных систем отопления «Теплые полы»;
- проанализированы основные причины возникновения пожаров при эксплуатации данных современных отопительных систем.

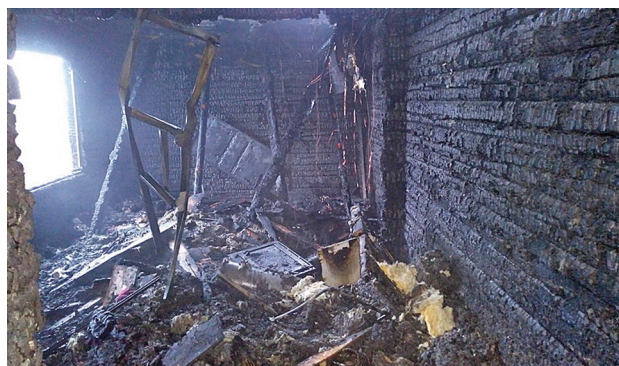


Рис. 7. Пожар дома в результате короткого замыкания в системе «Теплые полы»

Fig. 7. An indoor fire caused by the short circuit in the “Underfloor heating” system

Материалы и методы

По результатам одного из пожарно-технических исследований было установлено, что в полу кухонного помещения наблюдается сквозной прогар площадью около 1,5 м², выраженный в виде полного выгорания верхнего слоя пола, утеплителя и щелевых прогаров нижнего слоя пола. В других частях помещения пол подобных поражений не имеет (рис. 8).

Результаты исследования и их обсуждение

В качестве системы отопления рассматриваемого строения был смонтирован инфракрасный пленочный теплый пол MARPE. Инфракрасный пленочный теплый пол состоит из следующих элементов: полос углеродного материала шириной около 1,5 см, соединенных между собой при помощи медных шин с серебряным покрытием, которые проводят электрический ток. Нагревательный элемент заламинирован с двух сторон плотным полимером, который не задерживает инфракрасное излучение и обеспечивает защитную функцию. При проведении пожарно-технического исследования



Рис. 8. Панорамный снимок внутреннего объема помещения кухни (овалом обозначен прогар в полу)

Fig. 8. A panoramic shot of a kitchen (an oval indicates a burnout in the floor)



Рис. 9. Этапы укладки элементов экспериментальной установки

Fig. 9. A snapshot of the elements of the unit used in the experiment

необходимо установить пожарную опасность данной отопительной системы.

Для оценки зажигательной способности данного электрообогревательного устройства был проведен экспертный эксперимент, в ходе которого в нормальных условиях окружающей среды, при комнатной температуре был смоделирован участок напольного покрытия. Для этого на деревянные доски был положен лист ДСП, имитирующий непосредственно пол, далее на него укладывался слой фольгированного теплоизолятора, на который, в свою очередь, укладывался сам теплый пол, покрытый слоем линолеума (рис. 9). Далее теплый пол посредством зажимов был подключен к терморегулятору с термодатчиком, включенным в положение 40 °С. (рис. 10).

Для имитации реальных условий использования теплого пола в быту на поверхность линолеума были оперты ножки табурета (имитирующие локальное

давление мебели) с грузом на сиденье (имитирующим площадное давление мебели) и синтепоновое изделие (в качестве имитации подушки либо иного изделия, способного к накоплению теплоты) (рис. 11). Под каждым элементом и рядом с ним, между линолеумом и теплым полом была проложена термопара для измерения температуры нагрева. Результаты приведены на соответствующих графиках (рис. 12, 13).

Как видно из представленных на рис. 12 графиков, температурные зоны не являются однородными. Наибольший тепловой эффект был отмечен под синтепоновым изделием и у его границы. Так, за 2 ч 15 мин эксперимента температура под ним повысилась до 100 °С, в то время как в других зонах температура изменялась в интервале от 58 до 69 °С, и рост температуры в них был значительно ниже. При этом следует отметить, что терморегулятор, термодатчик которого был проложен под линолеумом у листа теплого пола, в ходе всего проводимого испытания не отключился. Таким образом, проведенный эксперимент показал, что наиболее опасным является накрывание теплого пола материалом, способным к накоплению теплоты, при этом локальность данного воздействия практически исключает возможность отключения установки от командного сигнала термодатчика.

Далее был выполнен эксперимент, в ходе которого определяли максимальную температуру разогрева установки, находящейся под синтепоновым изделием. Для этого была использована та же установка, с расположенным на ней синтепоновым изделием. Для измерения температуры на поверхности пленочного пола использованы шесть термопар. Результаты эксперимента приведены на рис. 13.

Как и в первом эксперименте, нагревание происходило неравномерно. Так, непосредственно



Рис. 10. Снимок терморегулятора экспериментальной установки

Fig. 10. A snapshot of the temperature controller of the experimental unit

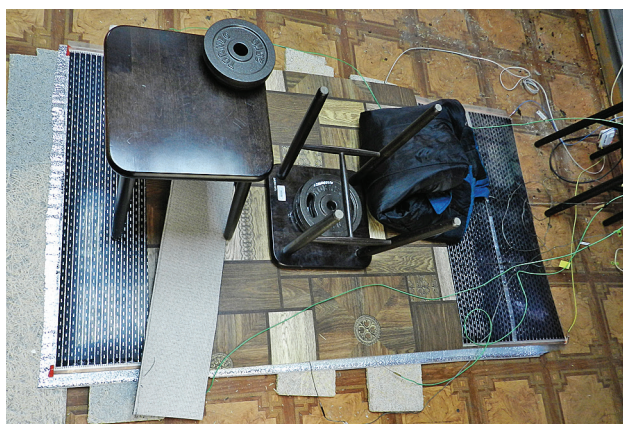


Рис. 11. Снимок расположения элементов при имитации использования пола в быту

Fig. 11. A snapshot of the layout of elements in the process of simulated day-to-day floor use

под синтепоновым изделием за 7 ч работы температура поднялась свыше 120 °С, после чего начал ощущаться специфический запах продуктов термического разложения синтетического изделия, и экс-

перимент был прекращен. При этом следует отметить, что у границы зоны, покрытой линолеумом, температура поверхности пленочного теплого пола составляла около 50 °С. В ходе всего эксперимента терморегулятор, термодатчик которого был проложен под линолеумом у листа теплого пола, в ходе всего проводимого испытания не отключился.

Далее при разборе конструкций было установлено, что непосредственно в зоне максимальных температур наблюдается оплавление фольгированного теплоизолятора, в результате которого произошло уменьшение сечения (рис. 14).

Уменьшение сечения привело к повышению сопротивления и, как следствие, к повышению температуры и локальному перегреву

Данный факт позволяет утверждать, что достигнутой температуры вполне достаточно для разложения полимерных элементов, что при увеличении длительности воздействия способно привести к возгоранию. Кроме того, была обнаружена локальная зона проплавления ламинирующей

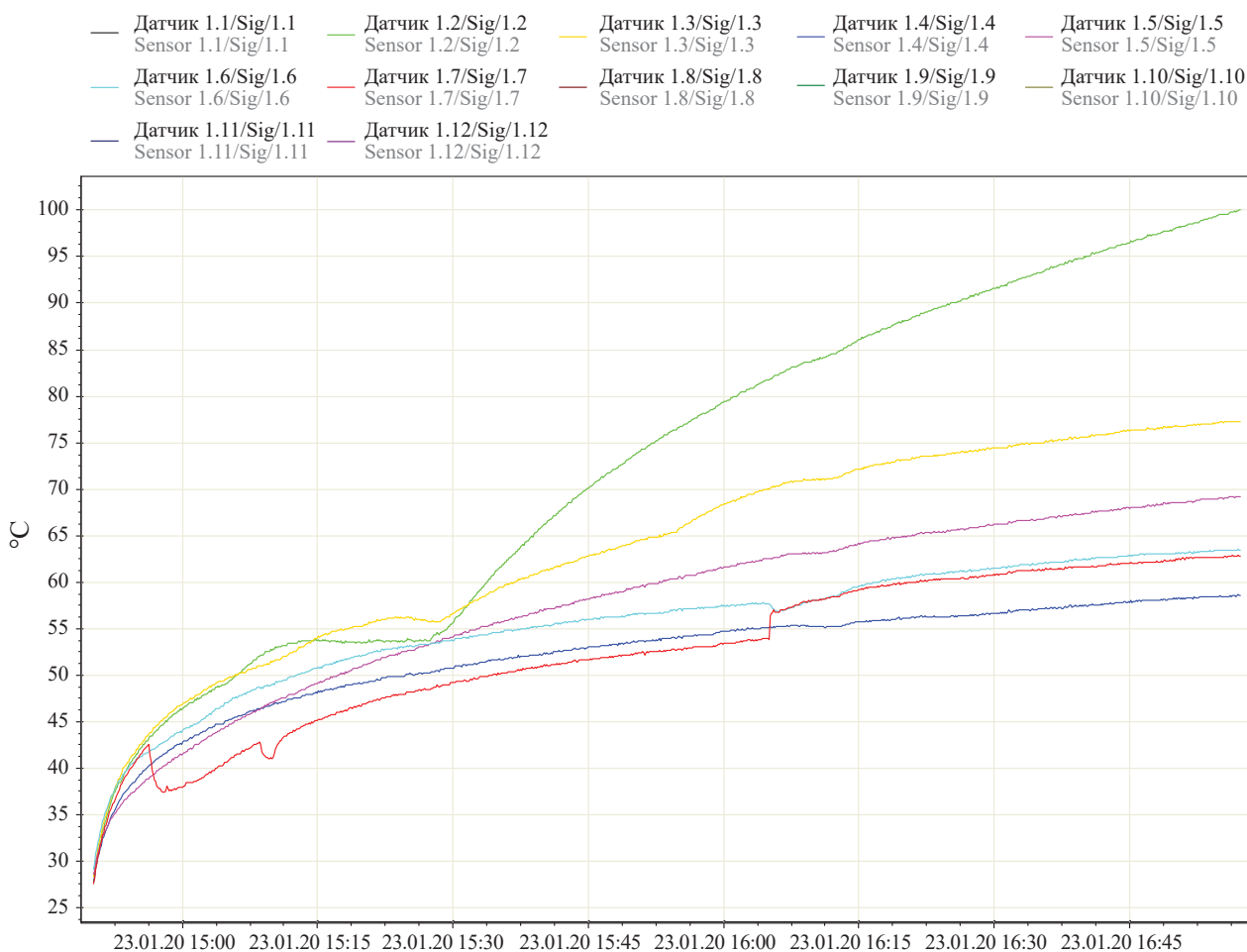


Рис. 12. Показания термопар: датчики 1.2, 1.3 — синтепоновое изделие и зона у его границы; датчики 1.4, 1.5 — сиденье табурета и его граница; датчики 1.6, 1.7 — ножка табурета и ее граница

Fig. 12. The readings of the thermocouple: sensor 1.2, 1.3 — the product made of polyester batting and its boundary; sensor 1.4, 1.5 — the stool seat and its boundary; sensor 1.6, 1.7 — the stool leg and its boundary)

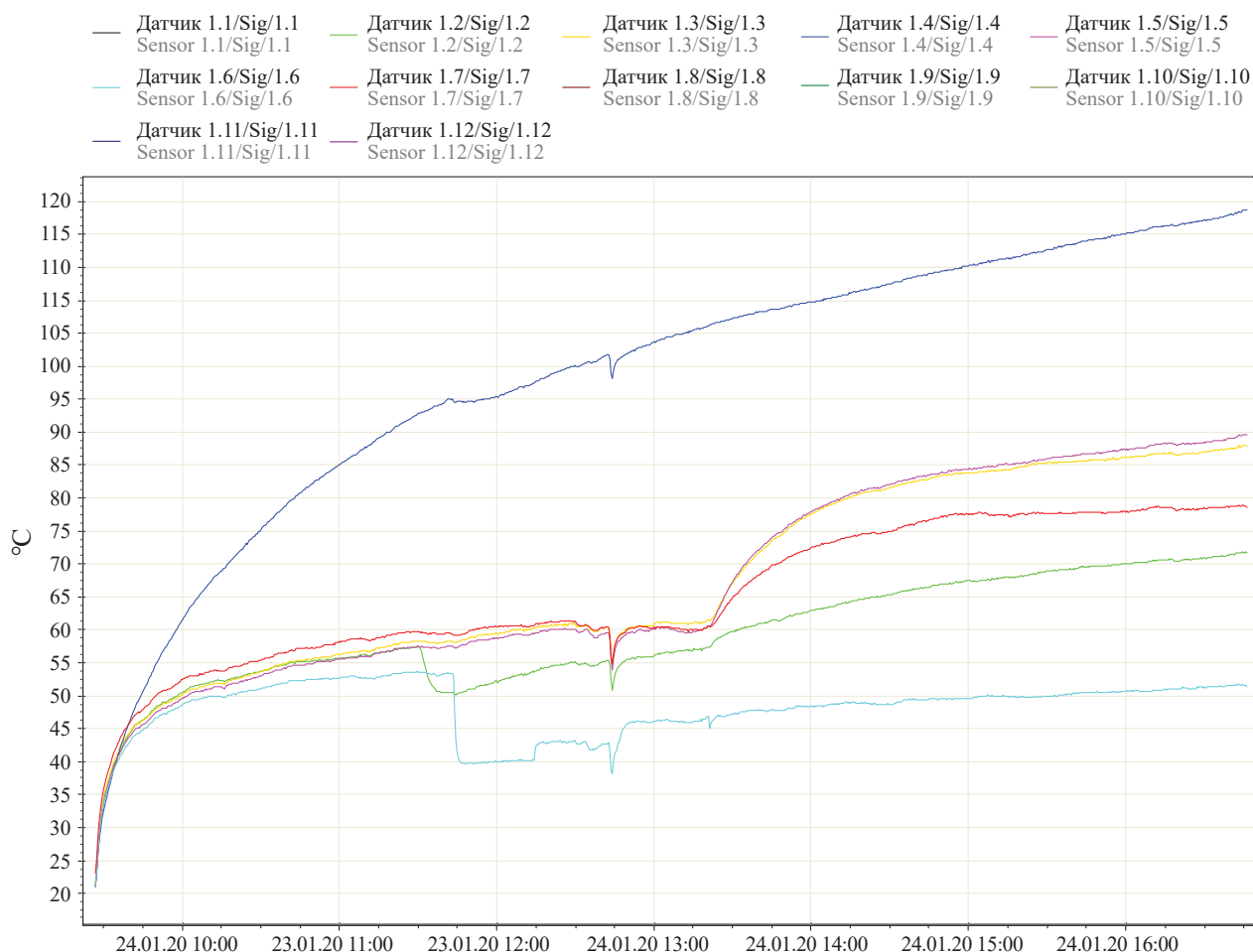


Рис. 13. Показания термопар: датчик 1.4 — синтепоновое изделие; датчики 1.2, 1.3, 1.5, 1.7 — зона непосредственно у синтепонового изделия; датчик 1.6 — зона у границы линолеума

Fig. 13. The readings of the thermocouple: sensor 1.4 — the product made of polyester batting; sensor 1.3, 1.5, 1.7, 1.2 — the area close to the product made of polyester batting; sensor 1.6 — the area at edge of the linoleum

пленки нагревательного элемента, проплавления фольгированного теплоизолятора, и на линолеуме над данной зоной наблюдалось оплавление внутренней поверхности (рис. 15). Можно предположить, что непосредственно в данной зоне ранее имелось механическое повреждение ламинирующей пленки, вследствие чего протекал локальный нагрев. Необходимо также отметить, что в данном

случае произошел лишь частичный разрыв полосы нагревательного элемента. Данный факт позволяет утверждать, что цепь на данном участке не разомкнулась, т.е. нагрев на данной, уже не защищенной ламинирующей пленкой нагревательной полосе продолжился.

Таким образом, приведенный выше эксперимент наглядно продемонстрировал, что тепловое воздействие электронагревательного прибора (теплый пол) может выступить в качестве источника зажигания. Поэтому наиболее вероятной причиной возникновения данного пожара послужило тепловое воздействие электронагревательной системы (теплый пол).

В качестве подтверждения данного вывода приведем пример еще одного пожара, связанного с инфракрасной нагревательной пленкой (рис. 16).

В одной из квартир возникли очаги интенсивного теплового воздействия на линолеум, которым был покрыт инфракрасный пленочный нагреватель MARPE, для обогрева помещения. Очаги были рас-



Рис. 14. Снимок расплавления фольгированного теплоизолятора

Fig. 14. The snapshot of the melting foil heat insulator



Рис. 15. Снимок локального расплавления ламинирующей пленки и нагревательного элемента, а также фольгированного теплоизолятора

Fig. 15. The snapshot of the melting laminating film and the heating element, as well as the foil heat insulator

положены в разных помещениях квартиры и появились практически в одно время.

При вскрытии напольного покрытия установлено, что инфракрасный пленочный нагреватель MARPE имеет следы термического повреждения (рис. 17). На одном из представленных на исследование кусков пленочного нагревателя остался прикипевший к нагревателю остаток линолеума (рис. 17, *d*).

При исследовании изъятых терморегуляторов каких-либо следов отключения или аварийного режима работы не выявлено. Терморегулятор был установлен на температуру чуть выше 40 °C и не сработал при повышении температуры пленочного пола под линолеумом (рис. 18, 19).

Следовательно, можно сделать вывод: при повышении температуры терморегулятор не сработал, что привело к повреждению напольного покрытия в нескольких местах, не связанных между собой. Следует отметить, что на полу в местах термических повреждений никакой мебели не было.

Выводы

Выполненный модельный эксперимент и материалы исследования пожара показали, что причиной



Рис. 16. Места повреждения линолеума в помещениях: *a* — коридор; *b* — веранда; *c* — спальня

Fig. 16. Damaged linoleum on the premises: *a* — hallway; *b* — veranda; *c* — bedroom

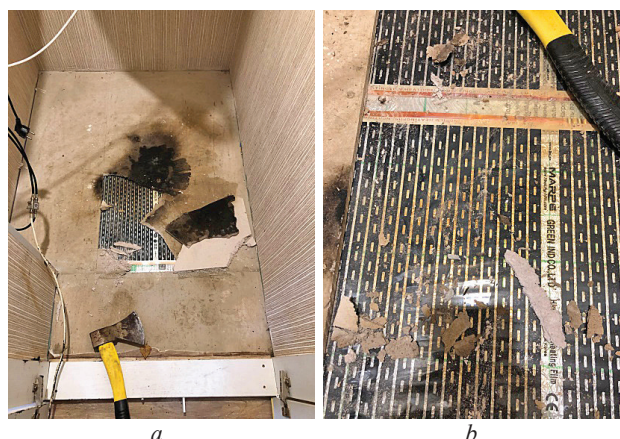


Рис. 17. Термические повреждения на изъятых с места происшествия образцах: на инфракрасной пленке (*a*, *b*, *d*) и на линолеуме (*c*)

Fig. 17. Thermally damaged samples: the infrared film (*a*, *b*, *d*) and the linoleum (*c*)

возникновения пожаров может стать не только аварийный режим работы электросети, но и сама инфракрасная нагревательная пленка теплого пола.

Таким образом, несмотря на все особенности современных систем «Теплые полы», их автоматизацию и модификацию, они остаются потенциально пожароопасными. Пожары современных отопительных систем «Теплые полы» могут возникнуть как в результате нарушения правил противопожарного режима при несоблюдении требований по эксплуатации отопительных приборов, так и в результате нештатного повышения температуры нагретых пленочных нагревателей, находящихся под напольными покрытиями.



Рис. 18. Терморегулятор для пленочного нагревателя

Fig. 18. The temperature controller of the film heater

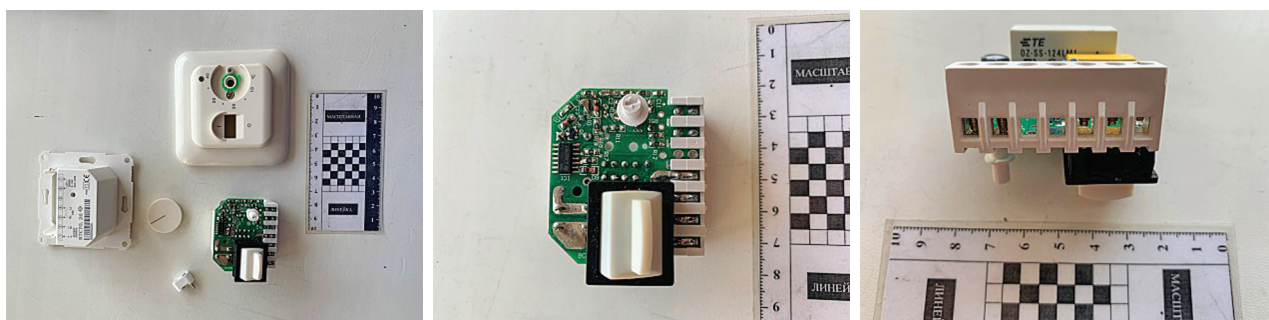


Рис. 19. Терморегулятор без признаков срабатывания или термических повреждений

Fig. 19. Temperature controller without signs of operation or thermal damage

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Государственный надзор МЧС России в 2018 году. Информационно-аналитический сборник. М. : ФГБУ ВНИИПО МЧС России, 2019. 125 с.
2. Статистика пожаров за 2019 год. Статистический сборник : Пожары и пожарная безопасность в 2019 году / под общ. ред. Гордиенко Д.М. М. : ФГБУ ВНИИПО. 2020. 82 с.
3. Шабловский Я.Р. Водяной теплый пол, как источник основного отопления жилых и производственных зданий с наивысшими показателями энергоэффективности, комфорта и эргономичности // Молодой ученый. 2014. № 11.1 (70.1). С. 28–29. URL: <https://moluch.ru/archive/70/12043/>
4. Лецинская Л.В., Малышев А.А. Отопление загородного дома. М. : Аделант. 2010. 384 с.
5. Papakostas K., Martinopoulou G., Papadopoulos A. A comparison of various heating systems in Greece based on efficiency and fuel cost // 17th International Symposium on Thermal Science and Engineering of SerbiaAt: Sokobanja. October 2015.
6. Berman A. The complete book of floors. London : Frances Lincoln Limited, 1997. 192 p.
7. Olesen B.W., Sommer K., D chting B. Control of slab heating and cooling systems studied by dynamic computer simulations // ASHRAE Transactions. 2000. Vol. 108 (2). Pp. 646–707.
8. Fazeli R., Davidsdottir B., Hallgr msson J.H. Residential energy demand for space heating in the Nordic countries: accounting for interfuel substitution // Renewable and Sustainable Energy Reviews. 2016. Vol. 57. Pp. 1210–1226. DOI: 10.1016/j.rser.2015.12.184
9. Halawa E., Chang K.C., Yoshinaga M. Thermal performance evaluation of solar water heating systems in Australia, Taiwan and Japan — A comparative review // Renewable Energy. 2015. Vol. 83. Pp. 1279–1286. DOI: 10.1016/j.renene.2015.04.023
10. Kolarik J. Simulation of energy use, human thermal comfort and office work performance in buildings with moderately drifting operative temperatures // Energy and Buildings. 2011. Vol. 43. No. 11. Pp. 2988–2997. DOI: 10.1016/j.enbuild.2011.07.008
11. Водяной теплый пол. Проектирование, монтаж, настройка. VALTEC. 2020. 114 с. URL: https://valtec.ru/document/technical/techdoc/teplyj_pol_a5.pdf
12. Ziemele J., Gravelsins A., Blumberga A., Blumberga D. Combining energy efficiency at source and at consumer to reach 4th generation district heating: economic and system dynamics analysis // Energy. 2017. Vol. 137. Pp. 595–606. DOI: 10.1016/j.energy.2017.04.123
13. Marcos J.D., Izquierdo M., Parra D. Solar space heating and cooling for Spanish housing: Potential energy savings and emissions reduction // Solar Energy. 2011. Vol. 85 (11). Pp. 2622–2641. DOI: 10.1016/j.solener.2011.08.006
14. Slini T., Giama E., Papadopoulos A.M. The impact of economic recession on domestic energy consumption // International Journal of Sustainable Energy. 2015. Vol. 34 (3-4). Pp. 259–270. DOI: 10.1080/14786451.2014.882335
15. Беарзи В. Теплые полы. Теория и практика // Вентиляция, отопление, кондиционирование воздуха, теплоснабжение и строительная теплофизика (АВОК). 2005. № 7. С. 70–82. URL: https://www.abok.ru/for_spec/articles.php?nid=3020
16. Чупин В.Р., Шелехов И.Ю., Пожидаев В.В. Инфракрасные системы обогрева // European Scientific Conference : сб. ст. X междунар. науч.-практ. конф. 7 июня 2018 г., г. Пенза : в 2-х ч. Ч. 1. Пенза : МЦНС «Наука и просвещение, 2018. С. 50–54. URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=35039789&>

17. Пожсидаев В.В., Шелехов И.Ю., Шишелова Т.И., Иноземцев В.П. Эффективная конструкция нагревательного элемента для инфракрасного обогрева // Известия вузов. Инвестиции. Строительство. Недвижимость. 2016. № 3 (18). С. 118–122. URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=26710328>
18. Пожсидаев В.В., Шелехов И.Ю., Иноземцев В.П. Новые технологии от идеи до внедрения // Интеллектуальный и научный потенциал 21 века : сб. ст. Междунар. науч.-практ. конф. 1 февраля 2016 г., г. Уфа. В 4-х ч. Ч. 3. Уфа : АЭТЕРА, 2016. С. 87–89.
19. Яковлев И.О. Особенности инновационной технологии теплых полов с пленочными нагревателями // Инновации, технологии и бизнес. 2019. № 2 (6). С. 117–119. URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=41412917>
20. Казаков Ю.Н., Новикова К.А., Макаридзе Г.Д. Оптимизация выбора и усовершенствование технологии устройства теплых полов // Вестник гражданских инженеров. 2020. № 2 (79). С. 109–116. DOI: 10.23968/1999-5571-2020-17-2-109-116
21. Лукьянов М.Ю. Водяной и инфракрасный теплый пол. Сравнение систем // Инновационная наука. 2015. № 12. С. 90–92. URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=25117593>
22. Уонг Х. Основные формулы и данные по теплообмену для инженеров. М. : Автомиздат, 2016. 216 с.
23. Obyn S., van Moeseke G. Comparison and discussion of heating systems for single-family homes in the framework of a renovation // Energy Conversion and Management. December 2014. Vol. 88. Pp. 153–167. DOI: 10.1016/j.enconman.2014.08.010
24. McNall P.E., Biddison R.E. Thermal and comfort sensations of sedentary persons exposed to asymmetric radiant fields // ASHRAE Transactions. 2010. Vol. 76.

REFERENCES

1. State supervision of the EMERCOM of Russia in 2018. Information and analytical collection. Moscow, FGBU VNIPO EMERCOM of Russia, 2019; 125. (rus.).
2. Fire statistics for 2019. Statistical collection: Fires and fire safety in 2019 ; Gordienko D.M. (ed.). Moscow, FGBU VNIPO, 2020; 82. (rus.).
3. Shablovsky Ya.R. Water underfloor heating, as a source of basic heating of residential and industrial buildings with the highest indicators of energy efficiency, comfort, and ergonomics. *A young scientist*. 2014; 11.1(70.1):28-29. URL: <https://moluch.ru/archive/70/12043/> (rus.).
4. Leshchinskaya L.V., Malyshev A.A. *Heating of a country house*. Moscow, Adelant Publ., 2010; 384. (rus.).
5. Papakostas K., Martinopoulou G., Papadopoulos A. A comparison of various heating systems in Greece based on efficiency and fuel cost. *17th International Symposium on Thermal Science and Engineering of Serbia At: Sokobanja*. 2015.
6. Berman A. *The complete book of floors*. London, Frances Lincoln Limited, 1997; 192.
7. Olesen B.W., Sommer K., D chting B. Control of slab heating and cooling systems studied by dynamic computer simulations. *ASHRAE Transactions*. 2000; 108(2):646-707.
8. Fazeli R., Davidsdottir B., Hallgr msson J.H. Residential energy demand for space heating in the Nordic countries: accounting for interfuel substitution. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. 2016; 57:1210-1226. DOI: 10.1016/j.rser.2015.12.184
9. Halawa E., Chang K.C., Yoshinaga M. Thermal performance evaluation of solar water heating systems in Australia, Taiwan and Japan — A comparative review. *Renewable Energy*. 2015; 83:1279-1286. DOI: 10.1016/j.renene.2015.04.023
10. Kolarik J. Simulation of energy use, human thermal comfort and office work performance in buildings with moderately drifting operative temperatures. *Energy and Buildings*. 2011; 43(11):2988-2997.
11. *Water underfloor heating. Design, installation, configuration*. VALTEC. 2020; 114. URL: https://valtec.ru/document/technical/techdoc/teplyj_pol_a5.pdf (rus.).
12. Ziemele J., Gravelins A., Blumberga A., Blumberga D. Combining energy efficiency at source and at consumer to reach 4th generation district heating: economic and system dynamics analysis. *Energy*. 2017; 137:595-606. DOI: 10.1016/j.energy.2017.04.123
13. Marcos J.D., Izquierdo M., Parra D. Solar space heating and cooling for Spanish housing: Potential energy savings and emissions reduction. *Solar Energy*. 2011; 85(11):2622-2641. DOI: 10.1016/j.solar.2011.08.006

14. Slini T., Giama E., Papadopoulos A.M. The impact of economic recession on domestic energy consumption. *International Journal of Sustainable Energy*. 2015; 34(3-4):259-270. DOI: 10.1080/14786451.2014.882335
15. Bearzi V. Warm floor. Theory and Practice. *Heating, Ventilation, Air Conditioning, District Heating, Building Physics Journal*. 2005; 7:70-82. URL: https://www.abok.ru/for_spec/articles.php?nid=3020 (rus.).
16. Chupin V.R., Shelekhov I.Yu., Pozhidaev V.V. Infrared heating systems. *European Scientific Conference : collection of articles of the X International Scientific and Practical Conference : in 2 parts. Part. 1. Penza, ICNS "Science and education"*, 2018; 51-53. URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=35039789&> (rus.).
17. Pozhidaev V.V., Shelekhov I.Yu., Shishelova T.I., Inozemtsev V.P. Effective construction of a heating element for infra-red heating. *Izvestiya vuzov. Investitsii. Stroitelstvo. Nedvizhimost/Proceedings of Universities. Investment. Construction. Real estate*. 2016; 3(18):118-122. URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=26710328> (rus.).
18. Pozhidaev V.V., Shelekhov I.Yu., Inozemtsev V.P. New technologies from idea to implementation. *Intellectual and scientific potential of the 21st century : a collection of articles of the International Scientific and Practical Conference (February 1, 2016, Ufa) : in 4 part. Z. Ufa, AETERA*, 2016; 87-89. (rus.).
19. Yakovlev I.O. Peculiarities of innovative technology of warm floors with film heaters. *Innovation, technology and business*. 2019; 117-119. URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=41412917> (rus.).
20. Kazakov Yu.N., Novikova K.A., Makaridze G.D. Optimization of selection and technology improvement for under floor heating design. *Vestnik Grazhdanskikh Inzhenerov/Bulletin of Civil Engineers*. 2020; 2(79):109-116. DOI: 10.23968/1999-5571-2020-17-2-109-116 (rus.).
21. Lukyanov M.Yu. Water and infrared underfloor heating. Comparison of systems. *International Scientific Journal "Innovative Science"*. 2015; 12:90-92. URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=25117593> (rus.).
22. Wong H. *Basic formulas and data on heat exchange for engineers*. Moscow, Atomizdat Publ., 2016; 216. (rus.).
23. Obyn S., van Moeseke G. Comparison and discussion of heating systems for single-family homes in the framework of a renovation. *Energy Conversion and Management*. 2014; 88:153-167. DOI: 10.1016/j.enconman.2014.08.010
24. McNall P.E., Biddison R.E. Thermal and comfort sensations of sedentary persons exposed to asymmetric radiant fields. *ASHRAE Transactions*. 2010; 76.

Поступила 11.01.2020, после доработки 06.05.2021;
принята к публикации 21.05.2021

Received January 11, 2021; Received in revised form May 6, 2021;

Accepted May 21, 2021

Информация об авторах

ПЛОТНИКОВА Галина Викторовна, канд. хим. наук, доцент, доцент кафедры пожарно-технической экспертизы, Восточно-Сибирский институт Министерства внутренних дел Российской Федерации, г. Иркутск, Российская Федерация; РИНЦ ID: 409919; ORCID: 0000-0003-2721-292X; e-mail: plotnikovagv@mail.ru

КУЗНЕЦОВ Константин Леонидович, канд. хим. наук, начальник, Судебно-экспертное учреждение Федеральной противопожарной службы «Испытательная пожарная лаборатория» по Иркутской области; доцент кафедры промэкологии и безопасности жизнедеятельности, Иркутский национальный исследовательский технический университет, г. Иркутск, Российская Федерация; РИНЦ ID: 1065126; ORCID: 0000-0002-8091-1247; e-mail: kuznets84@inbox.ru

ТИМОФЕЕВА Светлана Семеновна, д-р техн. наук, профессор, заведующий кафедрой промышленной экологии

Information about the authors

Galina V. PLOTNIKOVA, Cand. Sci. (Chem.), Docent, Associate Professor of Department of Fire Technical Examination, Eastern-Siberian Institute of the Ministry of Internal Affairs of the Russian Federation, Irkutsk, Russian Federation; ID RISC: 409919; ORCID: 0000-0003-2721-292X; e-mail: plotnikovagv@mail.ru

Konstantin L. KUZNETSOV, Cand. Sci. (Chem.), Chief, Judicial and Expert Establishment Fire-Fighting Service "Testing Fire Laboratory" across the Irkutsk Region; Associate Professor of Department of Industrial Ecology and Life Safety, Irkutsk National Research Technical University, Irkutsk, Russian Federation; ID RISC: 1065126; ORCID: 0000-0002-8091-1247; e-mail: kuznets84@inbox.ru

Svetlana S. TIMOFEEVA, Dr. Sci (Eng.), Professor, Head of Department of Industrial Ecology and Life Safety, Irkutsk National Research Technical University, Irkutsk, Russian

и безопасности жизнедеятельности, Иркутский национальный исследовательский технический университет, г. Иркутск, Российская Федерация; РИНЦ ID: 79973; ORCID: 0000-0001-8427-3732; e-mail: timofeeva@istu.edu

МОРОЗОВ Руслан Олегович, начальник сектора судебных экспертиз, Судебно-экспертное учреждение Федеральной противопожарной службы «Испытательная пожарная лаборатория» по Иркутской области, г. Иркутск, Российская Федерация; ORCID: 0000-0003-2667-6079; e-mail: ipl.irkutsk2013@mail.ru

ШЕКОВ Анатолий Александрович, канд. хим. наук, доцент, доцент кафедры пожарно-технической экспертизы, Восточно-Сибирский институт Министерства внутренних дел Российской Федерации, г. Иркутск, Российская Федерация; РИНЦ ID: 673937; ORCID: 0000-0003-2111-718X; e-mail: shek@inbox.ru

Federation; ID RISC: 79973; ORCID: 0000-0001-8427-3732; e-mail: timofeeva@istu.edu

Ruslan O. MOROZOV, Chief of the Forensic Science Sectors, Judicial and Expert Establishment Fire-Fighting Service “Testing Fire Laboratory” across the Irkutsk Region, Irkutsk, Russian Federation; ORCID: 0000-0003-2667-6079; e-mail: ipl.irkutsk2013@mail.ru

Anatoliy A. SHEKOV, Cand. Sci. (Chem.), Docent, Associate Professor of Department of Fire Technical Examination, Eastern-Siberian Institute of the Ministry of Internal Affairs of the Russian Federation, Irkutsk, Russian Federation; ID RISC: 673937; ORCID: 0000-0003-2111-718X; e-mail: shek@inbox.ru

Исследования возможности применения беспилотных авиационных систем для пожаротушения высотных зданий и сооружений

© С.Г. Цариченко¹ ✉, А.В. Островой², С.В. Карасев², М.Л. Пугачев¹

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

² ООО «Аура» (Россия, 119234, г. Москва, ул. Ленинские горы, 1, стр. 77, комн. 101)

АННОТАЦИЯ

Введение. Пожары в высотных зданиях и сооружениях представляют серьезную опасность как для находящихся в них людей, так и для материальных ценностей и самой конструкции здания. Зачастую развитие пожара происходит по наружной поверхности функционирующих объектов или внутри строящихся, что обуславливает проблему использования штатных инженерных решений по пожаротушению и требует применения мобильной техники оперативных подразделений пожарной охраны с использованием подачи огнетушащих средств снаружи здания.

Проблематика вопроса. Анализ эффективности различных способов подачи огнетушащих средств при тушении наружных пожаров высотных зданий показал недостаточно высокую эффективность наземной техники, что обуславливает необходимость рассмотреть возможность использования авиационных средств для тушения высотных зданий и сооружений. Учитывая требования, обеспечивающие эффективное пожаротушение с учетом требований безопасности и экономической целесообразности, в качестве летательного аппарата – носителя установки пожаротушения было выбрано беспилотное воздушное судно (БВС) AURA вертолетного типа. Для пожаротушения были использованы системы с различными огнетушащими средствами и способами их подачи в очаг горения, такими как импульсная подача воды и капсулы с огнетушащим составом, тонкораспыленная вода высокого давления и компрессионная пена. Основанием для выбора этих средств является возможность их подачи и применения на высоте до 300 м.

Результаты исследований. В ходе проведения испытаний ставились задачи определить возможность подачи огнетушащих составов в очаг горения при полете БВС, оценить эффективность этих огнетушащих средств и устойчивость БВС при подаче огнетушащих средств в очаг пожара. Для обеспечения безопасности испытания проводились на высоте, не превышающей 10 м, при этом были получены результаты, подтверждающие принципиальную возможность пожаротушения указанными средствами с использованием БВС AURA.

Выводы. В результате проведенных исследований были получены предварительные данные о возможности использования БВС с применением различных способов пожаротушения и горизонтальной подачей огнетушащих средств в качестве высокоэффективного средства борьбы с пожарами в высокоэтажных зданиях и сооружениях при подаче огнетушащих средств снаружи объекта.

Ключевые слова: пожар; беспилотное воздушное судно; испытания; тонкораспыленная вода; компрессионная пена; импульсное пожаротушение

Для цитирования: Цариченко С.Г., Островой А.В., Карасев С.В., Пугачев М.Л. Исследования возможности применения беспилотных авиационных систем для пожаротушения высотных зданий и сооружений // Пожаровзрывобезопасность/Fire and Explosion Safety. 2021. Т. 30. № 2. С. 54–64. DOI: 10.22227/0869-7493.2021.30.03.54-64

✉ Цариченко Сергей Георгиевич, e-mail: tsarichenko_s@mail.ru

A research into the potential application of unmanned aerial vehicles in the fire extinguishing of high-rise buildings and structures

© Sergey G. Tsarichenko ✉, Aleksandr V. Ostrovoy², Sergey V. Karasev², Maksim L. Pugachev¹

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

² LLC "Aura" (Leninskie Gory St., 1, bldg. 77, office 101, Moscow, 119234, Russian Federation)

ABSTRACT

Introduction. Fires in high-rise buildings and structures constitute a grave danger both to the people inside, valuables, and the building structure. More often than not, fires develop on the external surface of construction facilities that are in operation or inside those facilities that are under construction, and they give rise to the problem of using standard fire extinguishing solutions and require the employment of mobile machinery by fast response units of the fire-fighting service who apply fire extinguishing agents from the outside of a building. The purpose of this article is to substantiate the expediency of, or, on the contrary, the need to make the proposed amendments to Federal Law No. 123-FZ of July 22, 2008 "Technical Regulation of Fire Safety Requirements".

The scope of the problem. The analysis of the effectiveness of various methods of application of fire extinguishing agents used to extinguish outdoor fires in high-rise buildings has shown the insufficiently high efficiency of ground-mounted machinery, which preconditions the need to make an enquiry into the possibility of using aircraft to extinguish high-rise buildings and structures. Given the need to ensure effective fire extinguishing, meet safety and economic feasibility requirements, an autonomous unmanned aerial vehicle (AURA) was selected as the delivery vehicle. Systems using various fire extinguishing agents and methods of their application were used for fire extinguishing purposes, including a pulsed water application system, capsules containing the fire extinguishing composition, high-pressure water mist and compressed air foam. Their applicability at the height of 300 meters has determined their choice.

Research results. The testing task was to confirm the possibility of application of fire extinguishing agents to the fire seat in the course of the flight of an unmanned aerial vehicle, to identify the effectiveness of fire extinguishing agents and to assess the stability of extinguishing agents applied to the fire seat. To ensure safety, testing was carried out at the height not exceeding 10 m, and the results confirmed the possibility of using the above substances to extinguish fires.

Conclusions. The research has confirmed the possibility of using unmanned aerial vehicles and various methods of fire extinguishing by means of the horizontal application of extinguishing agents inside high-rise buildings and structures, if extinguishing agents are applied from outside of a construction facility.

Keywords: fire; unmanned aerial vehicle; test; water mist; compressed air foam; pulsed fire extinguishing

For citation: Tsarichenko S.G., Ostrovoy A.V., Karasev S.V., Pugachev M.L. A research into the potential application of unmanned aerial vehicles in the fire extinguishing of high-rise buildings and structures. *Pozharovzryvobezopasnost'/Fire and Explosion Safety*. 2021; 30(3):54-64. DOI: 10.22227/0869-7493.2021.30.03.54-64 (rus).

✉ Sergey Georgievich Tsarichenko, e-mail: tsarichenko_s@mail.ru

Введение

Высокоэтажные здания и технологические сооружения в настоящее время занимают значительную долю в общем количестве эксплуатируемых и строящихся объектов. Одной из важных задач на этапе строительства и дальнейшей их эксплуатации является обеспечение пожарной безопасности. Решению этой задачи отводится значительная часть исследований, что нашло отражение во многих работах, в частности [1–3]. Требования по обеспечению пожарной безопасности регламентируются нормативными документами: СП 267.1325800.2016 «Здания и комплексы высотные. Правила проектирования»¹, СП 394.1325800.2018 «Здания и комплексы высотные. Правила эксплуатации»² и другими документами, в которых достаточно полно отражены требования к материалам, конструкциям и средствам защиты таких сооружений.

¹ Здания и комплексы высотные. Правила проектирования: (СП 267.1325800.2016) : утвержден Приказом Министерства строительства и жилищно-коммунального хозяйства Российской Федерации от 30 декабря 2016 г. № 1032/пр и введен в действие с 1 июля 2017 г.

² Здания и комплексы высотные. Правила эксплуатации: (СП 394.1325800.2018) : утвержден Приказом Министерства строительства и жилищно-коммунального хозяйства Российской Федерации от 13 сентября 2018 г. № 578/пр и введен в действие с 14 марта 2019 г.

Однако статистика пожаров в высотных зданиях свидетельствует о высокой степени опасности этих сооружений, в связи с частотой и тяжестью этих пожаров. Наряду с пожарами, которые происходили во внутренних помещениях зданий и могли быть ликвидированы штатными системами пожаротушения, предусмотренными конструкцией зданий, достаточно большое количество пожаров происходило на внешней стороне или на строящихся объектах, где штатные системы пожаротушения еще не были смонтированы или не функционировали. Такие события имели место быть в Пекине³, в Шанхае⁴, в Красноярске⁵ и в Лондоне⁶. Быстрому распространению пламени по внешней стороне высотных зданий способствует воспламенение и горение облицовочных материалов и материалов вентилируемых фасадов, несмотря на требования и принципы конструирования, изложенные в работе [4].

³ В центре Пекина полыхает небоскреб Центрального телевидения. 2009. URL: <https://www.rbc.ru/society/09/02/2009/5703d1e39a79473dc814c477> (дата обращения: 14.05.2021).

⁴ 2010 Шанхайский пожар – 2010 Shanghai fire. URL: https://ru.qaz.wiki/wiki/2010_Shanghai_fire (дата обращения: 14.05.2021).

⁵ Люди спаслись из горящей многоэтажки благодаря сработавшей системе пожарной безопасности. URL: <https://www.krsk.kp.ru/daily/26285.7/3162537/> (дата обращения: 14.05.2021).

⁶ Пожар в здании Grenfell Tower в Лондоне. URL: https://ru.wikipedia.org/wiki/Пожар_в_здании_Grenfell_Tower_в_Лондоне (дата обращения: 14.05.2021).



Рис. 1. Тушение высотного здания с использованием наземной техники

Fig. 1. Using ground-mounted machinery to extinguish a fire in a high-rise building

Проблематика вопроса

Из проведенного анализа пожаров, имевших место в высотных зданиях, следует выделить класс пожаров, распространяющихся по наружной поверхности, ликвидация которых может быть осуществлена только при организации внешней подачи огнетушащих средств от мобильной техники оперативных служб пожаротушения. К таким пожарам следует отнести:

- пожары по поверхности вентилируемых фасадов;
- пожары на балконах и в отдельных квартирах;
- пожары на этажах строящихся зданий и сооружений.

Высота многих зданий и сооружений в настоящее время превышает рабочую высоту большинства видов высотной пожарной техники, например, для здания Bronto Skylift F112HLA высотой 112 м, что исключает возможность ее применения выше 37-го этажа, это иллюстрируется ситуацией при тушении высотного здания в Шанхае (рис. 1).

Кроме того, внутридворовые территории домов имеют узкие проезжие части с большим количеством припаркованных автомобилей, что сужает пространство для маневрирования и развертывания крупногабаритной пожарной техники. Также зачастую в нижней части здания устраиваются стилобаты с коммерческими площадями, в связи с чем пожарная техника увеличивает угол наклона лестницы и расстояние до цели, из-за чего может стать невозможным проведение спасательных или огнетушащих работ с данных автомобилей. В случае возникновения пожара на строящемся объекте развертывание мобильной крупногабаритной техники на неподготовленных площадках также не будет возможным.

В связи с этим представляется целесообразным рассмотреть вопрос возможности использования летательных аппаратов в качестве высоко мобильных средств доставки огнетушащих средств в зону пожара. Вопросам применения авиационных средств для проведения пожаротушения высотных зданий в последнее время отводится много внимания. Так, в работе [5] проводится анализ возможности и целесообразности использования как пилотируемых, так и беспилотных летательных аппаратов для тушения пожаров в высотных зданиях. Отмечается, что использование летательных аппаратов самолетного типа для тушения высотных зданий и сооружений не является целесообразным, в то время как применение летательных аппаратов вертолетного типа, на примере вертолетов КА-32, позволяет использовать водосливные устройства для тушения площадных пожаров и горизонтальную подачу огнетушащих средств при вертикальном расположении поверхности пожара и внутри здания (рис. 2).



a



b

Рис. 2. Пример применения вертолета для тушения пожара в высотном здании с использованием вертикальной (а) и горизонтальной (б) подачи огнетушащего вещества

Fig. 2. Using a helicopter to extinguish a fire in a high-rise building by means of (a) vertical and (b) horizontal application of the fire extinguishing agent

Проведенный анализ пожаров в высотных строящихся и эксплуатируемых зданиях и сооружениях в большинстве случаев имеет место во внутриэтажном пространстве и на вертикальной поверхности (вентилируемые фасады, балконы) [6], что обуславливает необходимость применения горизонтального способа подачи огнетушащих веществ при использовании летательных аппаратов вертолетного типа.

Очевидно, что для тушения рассмотренных типов пожара целесообразно использовать средства горизонтальной подачи огнетушащих веществ, в отличие от используемых в настоящее время водосливных устройств, обеспечивающих вертикальный слив огнетушащих средств на водной основе. В качестве примера авиационных систем с горизонтальной подачей могут быть рассмотрены импульсная установка пожаротушения IFEX и устройство горизонтальной подачи средства тушения, установленная на вертолете КА-32 [7]. Однако в условиях городской застройки и оперативного развертывания в зоне пожара использование таких систем весьма затруднительно.

В этом случае представляется целесообразным рассмотреть возможность применения беспилотных

авиационных систем (БАС), оснащенных средствами пожаротушения, обеспечивающих горизонтальную подачу огнетушащих средств непосредственно в очаг горения. В работах [8, 9] обосновывается целесообразность применения для тушения высотных зданий и сооружений беспилотных летательных аппаратов, обладающих рядом преимуществ по сравнению с наземной техникой — высотными подъемниками и лестницами, а также пилотируемыми вертолетами.

В целях разработки технологии тушения пожаров в высотных зданиях и сооружениях в наших исследованиях был использована БАС на основе беспилотного воздушного судна вертолетного типа AURA. Беспилотное воздушное судно AURA 100 (рис. 3) представляет собой малогабаритный многоцелевой летательный аппарат вертолетного типа соосной схемы, управляемый в полете автоматически. Основные технические характеристики приведены в табл. 1.

Основой БВС является фюзеляж, состоящий из силовой рамы и корпуса. Силовая рама предназначена для размещения (крепления) составных частей (систем). Рама представляет собой силовую сварную конструкцию из тонкостенных труб. К трубам прива-

Таблица 1. Технические характеристики БВС

Table 1. Technical characteristics of an unmanned aerial vehicle (UAV)

Наименование характеристики Characteristic	Значение Value
Диапазон рабочих температур, °C Range of operating temperatures, °C	–35...40
Максимальная взлетная масса БВС, кг Maximal takeoff mass, kg	350
Масса конструкции БВС, кг Mass of the UAV structure, kg	205
Масса полезного груза, кг Payload mass, kg	145
Максимальная скорость полета БВС, км/ч Maximal UAV flight speed, km/h	130
Крейсерская скорость БВС, км/ч UAV cruising speed, km/h	90
Статический потолок, м Stabilized ceiling, m	1400
Динамический потолок, м Dynamic ceiling, m	3000
Продолжительность полета БВС Span of flight of an UAV	3
Мощность двигателя, л.с. Motor capacity, horsepower	65



Рис. 3. Беспилотное воздушное судно AURA 100

Fig. 3. AURA 100 unmanned aerial vehicle

рены кронштейны для размещения составных частей систем вертолета. Корпус представляет собой составную стеклопластиковую конструкцию. Составные части корпуса соединены непосредственно с рамой и между собой. На боковых поверхностях имеются жалюзи для забора воздуха в воздухопроводы и подвода к карбюраторам, а также отброса теплого воздуха от системы охлаждения двигателя. Для простоты обслуживания БВС боковины выполнены быстросъемными, а на основаниях располагаются необходимые эксплуатационные люки.

В качестве схемы расположения несущих винтов используется соосная схема (винты располагаются на одной оси один над другим, и вращение происходит синхронно в противоположных направлениях). Каждый из несущих винтов представляет собой металлическую втулку с торсионным шарниром и двумя алюминиевыми лопастями. Диаметр винтов 4,5 м.

В качестве возможных высокоэффективных способов пожаротушения с горизонтальным способом подачи огнетушащих средств предлагается рассмотреть:

- импульсное пожаротушение водой;
- импульсное пожаротушение капсулой с огнетушащим средством;
- пожаротушение струей тонкораспыленной воды;
- пожаротушение компрессионной пеной.

Выбор представленных способов пожаротушения обусловлен возможностью доставки указанных огнетушащих составов на высоту порядка 200...300 м и их подачи в очаг горения с требуемой интенсивностью.

Импульсный способ подачи огнетушащих средств в очаг пожара в высокоэтажном здании с использованием БВС представляется эффективным способом локализации пожара на начальной его стадии. Опыт компании IFEX GmbH (Германия) свидетельствует о возможности и эффективности использования импульсных установок во-

дяного пожаротушения, установленных на борту вертолета [7].

В ходе проведения испытаний с БВС AURA была использована модернизированная ранцевая установка IFEX-3000, обеспечивающая эффективную подачу в очаг пожара как заряда диспергированной воды, так и капсулированного заряда, содержащего порошковый, газоаэрозольный или хладоновый огнетушащие составы. Кроме того, капсулированный заряд также позволяет осуществлять разрушение оконных стекол для дальнейшей подачи в очаг горения водопенных средств тушения. Автономное оборудование, установленное на борту БВС с необходимым запасом огнетушащего состава, обеспечивает ему необходимую маневренность. При этом надо учитывать ограниченный запас огнетушащих средств в пределах максимальной грузоподъемности в пределах 145 кг и необходимость обеспечить точность наведения установки с учетом устойчивости летательного аппарата при выстреле.

Общий вид модернизированной установки IFEX-3000 представлен на рис. 4. Штатная установка была модернизирована в части доработки системы перезарядки, использования системы наведения на очаг горения и дистанционного управления

В случае необходимости подачи огнетушащих средств из наземного источника на большую высоту технически реализуемыми могут быть рассмотрены тонкораспыленная вода высокого давления (ТРВ ВД) и компрессионная пена.

Применение ТРВ ВД в качестве огнетушащего средства для пожаротушения различных материалов было обосновано в многочисленных исследованиях [10–12], что обусловлено высокой огнетушащей эффективностью мелко диспергированных капель воды, их высокой кинетической составляющей, что позволяет тушить не только открытые очаги горения, но и затененные зоны горения. При этом реализуется относительно небольшой расход



Рис. 4. Общий вид БВС с установкой импульсного пожаротушения IFEX

Fig. 4. The main view of an UAV carrying IFEX pulsed fire extinguishing system

воды, по сравнению с традиционным способом тушения, обеспечивающий отсутствие значительного вторичного ущерба от проливов воды. Кроме того, используемое рабочее давление насосов порядка 100...200 атм, что может позволить обеспечить эффективную подачу воды от наземного источника на высоту до 300 м. Эффективность использования ТРВ ВД для тушения высотных зданий подтверждена в ряде работ [13–15].

В случае использования установки пожаротушения с ТРВ ВД, смонтированной на БВС AURA, начальное давление на выходе насосного агрегата составляет 150 атм при расходе воды $1,5 \text{ л} \cdot \text{с}^{-1}$, при этом потери на преодоление статического и гидравлического сопротивления при высоте водяного столба 300 м не превысят 60...70 атм. При условии обеспечения расчетного рабочего давления на сопловом насадке ствола 80 атм будет обеспечен нормальный режим подачи струи воды на расстояние в статическом состоянии ствола до 25...30 м. Заявленная высота 300 м является предельной высотой для используемого оборудования компании «Простор», а также БВС AURA в части его грузоподъемности, так как масса рукавной линии внутренним диаметром 14 мм, обеспечивающая требуемый расход воды, составит порядка 130 кг, что находится на пределе его грузоподъемности.

Для ликвидации пожаров в высотном здании в развитой стадии горения, когда требуется обеспечить высокую интенсивность подачи огнетушащего средства в течение продолжительного отрезка времени из наземного источника, может быть использована компрессионная пена. Физико-химические характеристики компрессионной пены обеспечивают более высокую эффективность пожаротушения по сравнению с воздушно-механическими пенами [16–18], получаемыми в эжекционных пеногенераторах, а именно:

- меньшая интенсивность подачи и, соответственно, расход огнетушащего состава;
- меньшее воздействие на окружающую среду за счет меньшего использования пенообразователя;
- большая дальность подачи струи пены в очаг горения;
- более высокая стабильность и устойчивость пены;
- высокая адгезионная способность;
- возможность тушения электроустановок без отключения напряжения;
- меньшая масса и гидравлическое сопротивление рукавной линии.

Последнее свойство позволяет рассматривать применение компрессионной пены в качестве способа пожаротушения высотных зданий с использо-

ванием БВС AURA при подаче огнетушащих составов от наземного источника на его борт [8, 19]. При этом необходимо учитывать возможную нестабильность компрессионной пены при подаче ее на большую высоту при определенных режимах работы, о чем было отмечено в работе [8], что обуславливает необходимость проведения дополнительных исследований с учетом методических подходов, изложенных в работе [20]

Результаты исследований

Для реализации горизонтального способа пожаротушения высотных зданий и сооружений было установлено специальное оборудование, которое позволяло осуществлять подачу огнетушащих веществ автономно и непосредственно из наземных источников.

Общий вид и конструкция лафетного ствола для подачи ТРВ ВД и компрессионной пены, вынесенного за пределы плоскости винтов, представлены на рис. 5. Конструктивное отличие ствола для подачи пены и ТРВ ВД заключается в различной форме соплового насадка и подводящей магистральной линии.

Присоединение рукавной линии для подачи огнетушащих средств из наземного источника обеспечи-

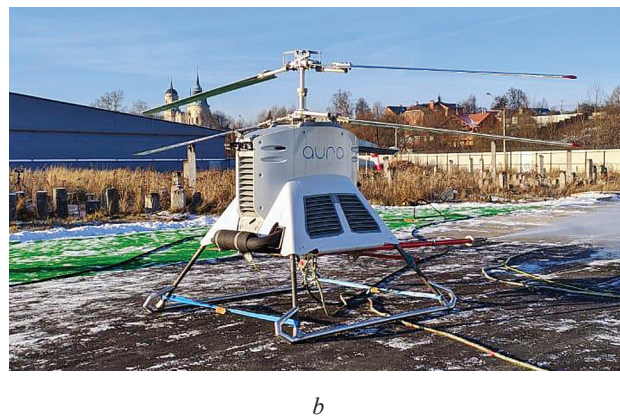
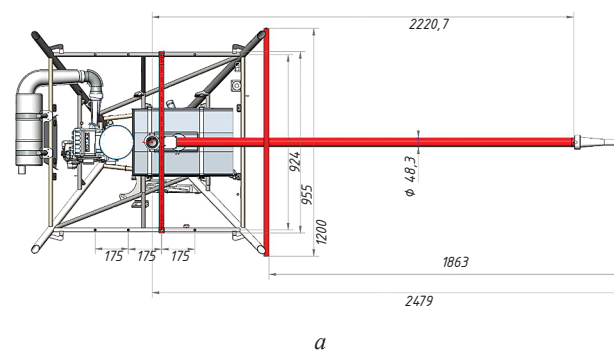


Рис. 5. Схема (а) и общий вид (б) лафетного ствола для подачи ТРВ и компрессионной пены

Fig. 5. The diagram (a) and the main view (b) of a firefighting monitor cannon used to apply water mist and compressed air foam

вается через автоматический соединительный разъем, что является необходимым условием для отстыковки рукавной линии при посадке БВС или в случае развития нештатной ситуации.

Основными задачами проведенных испытаний были определение возможности подачи огнетушащих составов в очаг горения при полете БВС, оценка эффективности этих огнетушащих средств и устойчивости БВС при подаче огнетушащих средств в очаг пожара.

В целях обеспечения безопасности испытания по тушению модельного очага горения проводились при высоте полета БВС, не превышающей 10 м. В качестве модельного очага пожара использовалась модель, эквивалентная очагу класса 6А, установленная в окне фрагмента дома на высоте 1,5 м от земной поверхности (рис. 6).

Результаты испытаний приведены в табл. 2, из них следует, что при реализуемых расходах огнетушащих веществ БВС не потерял остойчивость, что позволило обеспечить попадание огнетушащих веществ в очаг пожара и осуществить эффективное тушение. Особо следует отметить серию импульсных испытаний установки IFEX-3000, в ходе которых при выстреле как водяным зарядом, так и капсулой массой 1 кг видимых отклонений в положении БВС не наблюдалось,

что объясняется соотношением массы заряда $m_z = 1$ кг и массы вертолета $m_v \sim 300$ кг при скорости выхода заряда из ствола $V_z = 100$ м/с. Тогда, исходя из закона сохранения импульса $m_z V_z = m_v V_v$, скорость отдачи БВС составит $V_v \sim 0,3$ м/с. При этом интенсивность подачи воды определяется из расчета массы заряда, подаваемого в очаг горения с интервалом 2 с, ее значение составляет 0,5 л/с.

Результаты испытаний с использованием ТРВ ВД и компрессионной пены также показали возможность применения данных систем в составе БАС с использованием БВС AURA для тушения пожаров высокоэтажных домов и конструкций. При этом зафиксированная дальность подачи ОТВ позволяет сделать заключение о возможности эффективно осуществлять процесс тушения, находясь на безопасном расстоянии от аварийного сооружения.

В целях повышения эффективности пожаротушения целесообразно рассмотреть возможность применения комбинированного способа пожаротушения, при котором в очаг горения подаются поочередно комбинированные огнетушащие составы типа «тонкораспыленная вода – огнетушащий порошок», «пена – огнетушащий порошок». Результаты исследований [21, 22] свидетельствуют о значительном эффекте синергизма при использовании таких

Таблица 2. Результаты проведения испытаний

Table 2. Testing results

Способ пожаротушения Fire extinguishing method	Интенсивность подачи ОТВ, л/с Fire extinguishing agent application intensity, liter/sec	Дальность подачи ОТВ, м Range of the fire extinguishing agent application, m	Попадание ОТВ в очаг пожара Ability of the fire extinguishing agent to hit the fire seat	Устойчивость БВС Stability of an unmanned aerial vehicle	Факт тушения Successful fire extinguishing
Импульсная подача воды Pulsed application of water	0,5	12...14	+	+	+
Импульсная подача капсулы Pulsed application of a capsule	—	15	+	+	+
ТРВ ВД High pressure water mist	1,5	20...25	+	+	+
Компрессионная пена Compressed air foam	1,0	25...28	+	+	+

способов. Учитывая полученные в ходе начального этапа испытаний результаты, подтверждающие возможность подачи указанных огнетушащих средств, представляется целесообразным в дальнейшем оснастить БВС AURA комбинированной установкой подачи огнетушащих средств в целях повышения эффективности пожаротушения.

Выводы

Проведенный анализ возможности использования БВС с применением различных способов пожаротушения и горизонтальной подачей огнетушащих средств показал, что, несмотря на имеющийся ряд технических проблем, БВС является высокоэффективным средством борьбы с пожарами в высокоэтажных зданиях и сооружениях для подачи огнетушащих средств снаружи объекта на большой высоте. Проведенный цикл первичных испытаний различных типов систем пожаротушения, таких как импульсная подача ОТВ, ТРВ ВД и компрессионной пены с использованием БВС AURA, подтвердил правильность сделанных выводов.

Однако для окончательного решения о возможности использования такого способа пожаротушения

необходимо провести комплекс исследований и испытаний с целью решения следующих задач:

- определить эффективные параметры подачи ОТВ в очаг пожара в зависимости от его характера, стадии развития и места расположения;
- определить предельные технические возможности БВС AURA по использованию различных систем пожаротушения в части грузоподъемности, высоты подъема, маневренности;
- рассмотреть возможность и определить параметры применения других, отличных от рассмотренных, способов пожаротушения, таких как комбинированное пожаротушение, тушение термоактивированной водой и др.;
- автоматизировать процессы управления БВС и систем пожаротушения в условиях реального пожара;
- обеспечить возможность безопасного полета БВС в условиях воздействия опасных факторов, таких как ветровая нагрузка, конвективные потоки в зоне пожара, тепловое воздействие от очага пожара, задымленность;
- разработать нормативные документы, регламентирующие порядок проведения операций пожаротушения с использованием БВС.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Копылов Н.П. Сравнительный анализ противопожарных требований к высотным и многофункциональным зданиям в России и за рубежом // Пожарная безопасность многофункциональных и высотных зданий и сооружений : мат. XIX науч.-практ. конф. М. : ВПИИПО, 2005. С. 31–47.
2. Aluthwala A.D., Wickramaratne D.K.S., Wijeratne R.K.M.J.B., Jayasinghe M.T.R. Fire safety in high rise buildings // Annual Transactions of The Institution of Engineers. Sri Lanka, 2007. Pp. 1–5.
3. Казакова В.А., Терещенко А.Г., Недвига Е.С. Пожарная безопасность высотных многофункциональных зданий // Строительство уникальных зданий и сооружений. 2014. № 3 (18). С. 38–56. DOI: 10.18720/CUBS.18.4 URL: <https://unistroy.spbstu.ru/article/2014.18.4/>
4. Воробьев В.Н. Навесные фасадные системы. Рекомендации по обеспечению пожарной безопасности. 2017. 44 с.
5. Пашов С.С., Бородин В.А., Киреев Д.Д. Применение пилотируемых и беспилотных авиационных комплексов для разведки, тушения пожаров и проведения аварийно-спасательных работ в зданиях повышенной этажности // Современные технологии обеспечения гражданской обороны и ликвидации последствий чрезвычайных ситуаций. 2019. Т. 10. № 1. С. 291–292. URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=39842460>
6. Подгрушный А.В., Денисов А.Н., Хонг Ч.Д. Проблемы тушения пожаров в зданиях повышенной этажности и высотных зданиях // Пожаровзрывобезопасность/Fire and Explosion Safety. 2007. Т. 16. № 6. С. 56–59. URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=12513091>
7. Изерушев Д.Е., Хабилов В.Г. Проблемы тушения пожара в высотных зданиях и зданиях повышенной этажности // Молодежный вестник Уфимского государственного авиационного технического университета. 2019. Т. 20. № 1. С. 75–80. URL: <http://journal.ugatu.ac.ru/index.php/mvu/article/view/2782>
8. Гордиенко Д.М., Логинов В.И., Осипов Ю.Н., Еришов В.И., Михайлова Е.Д. Проблема использования беспилотных авиационных систем для тушения пожаров в зданиях повышенной этажности // Пожаровзрывобезопасность/Fire and Explosion Safety. 2019. Т. 28. № 4. С. 82–91. DOI: 10.18322/PVB.2019.28.04.82-91

9. Pechoa P., Magdolenová P., Bugaja M. Unmanned aerial vehicle technology in the process of early fire localization of buildings // *Transportation Research Procedia*. 2019. Vol. 40. Pp. 461–468. DOI: 10.1016/j.trpro.2019.07.067
10. Grant G., Brenton J., Drysdale D. Fire suppression by water sprays // *Progress in Energy and Combustion Science*. 2000; 26:79. DOI: 10.1016/s0360-1285(99)00012-x
11. Jianghong Liu, Guangxuan Liao, Peide Li, Weicheng Fan, Qiang Lu. Progress in research and application of water mist fire suppression technology // *Chinese Science Bulletin*. 2003. Vol. 48. Pp. 718–725. DOI: 10.1007/BF03187040
12. Fitri Pancawardani, Dwi Arini Randy, Putra Yunindar Mohamad, Lutfi Ramadhan Fahri, Ali Imran Yulianto, Sulisty Nugroho. Analysis of water mist fire suppression system applied on cellulose fire // *Procedia Engineering*. 2017. Vol. 170. Pp. 344–351. DOI: 10.1016/j.pro-eng.2017.03.049
13. Корольченко Д.А., Громовой В.Ю., Ворогушин О.О. Применение тонкораспыленной воды для тушения пожаров в высотных зданиях // *Пожаровзрывобезопасность/Fire and Explosion Safety*. 2011. Т. 20. № 8. С. 54–57. URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=16903034>
14. CEN/TS 14972:2011. Ortsfeste Brandbekämpfungsanlagen – Feinsprüh-Löschanlagen. Planung und Einbau; Deutsche Fassung, Belgium, Brüssel, Europäisches Komitee für Normung, 2011. S. 9.
15. NFPA 750. Standard on water mist fire protection systems. Las Vegas, An International Codes and Standards Organization, National Fire Protection Association, 2015. 88 p.
16. Kim A., Dlugogorski B.Z. Multipurpose overhead compressed-air foam system and its fire suppression performance // *Journal of Fire Protection Engineering*. 1997. Vol. 8 (3). Pp. 133–150. DOI: 10.1177/104239159600800303
17. Taylor R.G. Technical Report 98: Compressed Air Foam Systems in Limited Staffing Conditions / R.G. Taylor – Morristown Fire Bureau – Morristown, New Jersey. 1998. Pp. 75–112.
18. Okunrounu Oluwadamilola, Paul Lhotsky P., Hadjisophocleous G. Discharge characteristics of a portable compressed air foam system // *Journal of Physics: Conference Series*. 2018. Vol. 1107. P. 062007. DOI: 10.1088/1742-6596/1107/6/062007
19. Гордиенко Д.М., Павлов Е.В., Осипов Ю.Н., Ершов В.И., Панфилова Е.В. Проблемы использования компрессионной пены для тушения пожаров в зданиях повышенной этажности с применением беспилотных авиационных систем // *Пожарная безопасность/Fire Safety*. 2019. Т. 96. № 3. С. 42–46.
20. Грачулин А.В. Экспериментальные исследования движения компрессионной пены в горизонтальном цилиндрическом канале // *Вестник Командно-инженерного института МЧС Республики Беларусь*. 2016. № 1 (23). С. 68–77. URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=25449221>
21. Толкачев О.Э., Дикенштейн И.Ф., Балта Д.Ф. Взаимное усиление огнетушащей эффективности комбинации веществ порошок – тонкораспыленная вода // *Вестник Академии гражданской защиты*. 2017. № 4 (12). С. 57–62. URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=32709764>
22. Дикенштейн И.Ф., Балта Д.Ф. Комбинированное пожаротушение составом «порошок – воздушно-механическая пена» // *Математическое моделирование в образовании, науке и производстве : мат. X междунар. конф. 28–30 сентября 2017 г. Тирасполь, 2017.*

REFERENCES

1. Kopylov N.P. Comparative analysis of fire protection requirements for high-rise multifunctional buildings in Russia and abroad. *Fire safety of multifunctional and high-rise buildings and structures : materials of the XIX scientific and practical conference*. Moscow, VPIPO, 2005; 31-47. (rus).
2. Aluthwala A.D., Wickramaratne D.K.S., Wijeratne R.K.M.J.B., Jayasinghe M.T.R. Fire safety in high rise buildings. *Annual Transactions of the Institution of Engineers*. Sri Lanka, 2007; 1-5.
3. Kazakova V.A., Tereshchenko A.G., Nedviga E.S. The high-rise buildings fire safety. *Construction of unique buildings and structures*. 2014; 3(18):38-56. DOI: 10.18720/CUBS.18.4 URL: <https://unistroy.spbstu.ru/article/2014.18.4/> (rus).
4. Vorobyov V.N. *Curtain wall systems. Recommendations for ensuring fire safety*. 2017; 44. (rus).
5. Pashov S.S., Borodin V.A., Kireev D.D. Application of manned and unmanned aircraft systems for reconnaissance, fire extinguishing and emergency rescue operations in high-rise buildings. *Modern technologies for ensuring civil defense and eliminating the consequences of emergency situations*. 2019; 10(1):291-292. URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=39842460> (rus).

6. Podgrushnyy A.V., Denisov A.N., Khong Ch.D. Problems of extinguishing fires in high-rise buildings-news and high-rise buildings. *Pozharovzryvbezopasnost/Fire and Explosion Safety*. 2007; 6(16):56-59. URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=12513091> (rus).
7. Iserusev D.E., Khabirov G.V. The problem of fire extinguishing in high-rise buildings and buildings of increased floor. *Youth Bulletin of the Ufa State Aviation Technical University*. 2019; 20(1):75-80. URL: <http://journal.ugatu.ac.ru/index.php/mvu/article/view/2782> (rus).
8. Gordienko D.M., Loginov V.I., Osipov Yu.N., Yershov V.I., Mikhailova E.D. The problem of using unmanned aircraft systems for extinguishing fires in high-rise buildings. *Pozharovzryvbezopasnost/Fire and Explosion Safety*. 2019; 28(4):82-91. DOI: 10.18322/PVB.2019.28.04.82-91. (rus).
9. Pechoa P., Magdolenová P., Bugaja M. Unmanned aerial vehicle technology in the process of early fire localization of buildings. *Transportation Research Procedia*. 2019; 40:461-468. DOI: 10.1016/j.trpro.2019.07.067
10. Grant G., Brenton J., Drysdale D. Fire suppression by water sprays. *Progress in Energy and Combustion Science*. 2000; 26:79. DOI: 10.1016/s0360-1285(99)00012-x
11. Jianghong Liu, Guangxuan Liao, Peide Li, Weicheng Fan, Qiang Lu. Progress in research and application of water mist fire suppression technology. *Chinese Science Bulletin*. 2003; 48:718-725. DOI: 10.1007/BF03187040
12. Fitri Pancawardani, Dwi Arini Randy, PutraYunindar Mohamad, Lutfi Ramadhan Fahri, AliImran Yulianto, Sulisty Nugroho. Analysis of water mist fire suppression system applied on cellulose fire. *Procedia Engineering*. 2017; 170:344-351. DOI: 10.1016/j.proeng.2017.03.049
13. Korolchenko D.A., Gromovoy V.Yu., Vorogushin O.O. Fire extinguishing in tall buildings by using water mist systems. *Pozharovzryvbezopasnost/Fire and Explosion Safety*. 2011; 20(8):54-57. URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=16903034> (rus).
14. CEN/TS 14972:2011. *Ortsfeste Brandbekämpfungsanlagen – Feinsprüh-Löschanlagen*. Planung und Einbau; Deutsche Fassung, Belgium, Brüssel, Europäisches Komitee für Normung, 2011; 9.
15. NFPA 750. *Standard on water mist fire protection systems*. Las Vegas, An International Codes and Standards Organization, National Fire Protection Association, 2015; 88.
16. Kim A., Dlugogorski B.Z. Multipurpose overhead compressed-air foam system and its fire suppression performance. *Journal of Fire Protection Engineering*. 1997; 8(3):133-150. DOI: 10.1177/104239159-600800303
17. Taylor R.G. *Technical Report 98: Compressed Air Foam Systems in Limited Staffing Conditions*. R.G. Taylor – Morristown Fire Bureau – Morristown, New Jersey, 1998; 75-112.
18. Oluwadamilola O., Lhotsky P., Hadjisophocleous G. Discharge characteristics of a portable compressed air foam system. *Journal of Physics: Conference Series*. 2018; 1107:062007. DOI: 10.1088/1742-6596/1107/6/062007
19. Gordienko D.M., Pavlov E.V., Osipov Yu.N., Yershov V.I., Panfilova E.V. Problems of compression foam usage for fire extinguishing in high-rise buildings by means of unmanned aviation systems. *Pozharnaya bezopasnost'/Fire Safety*. 2019; 96(3):42-46. (rus).
20. Grachulin A.V. Experimental research of the motions of compressed air foam in horizontal cylindrical channel. *Vestnik of the Institute for Command Engineers of the MES of the Republic of Belarus*. 2016; 1(23):68-77. URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=25449221> (rus).
21. Tolkachev O.E., Dikenshtein I.F., Balta D.F. Mutual strengthening of the fire-extinguishing efficiency of the combination of substances powder – thinly sprayed water. *Bulletin of the Academy of Civil Protection*. 2017; 4(12):57-62. URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=32709764> (rus).
22. Dikenshtein I.F., Balta D.F. Combined fire extinguishing with the composition “powder-air-mechanical foam”. *Mathematical modeling in education, science and production : materials of the X international conference. 28-30 September 2017*. Tiraspol, 2017. (rus).

Поступила 01.02.2021, после доработки 26.02.2021;
принята к публикации 10.03.2021

Received February 1, 2021; Received in revised form February 26, 2021;
Accepted March 10, 2021

Информация об авторах

ЦАРИЧЕНКО Сергей Георгиевич, д-р техн. наук, профессор кафедры комплексной безопасности в строительстве, Национальный исследовательский Московский государственный университет

Information about the authors

Sergey G. TSARICHENKO, Dr. Sci. (Eng.), Professor of Department of Integrated Safety in Civil Engineering, Moscow State University of Civil Engineering (National Research University of Civil Engineering)

ственный строительный университет, г. Москва, Российская Федерация; Scopus Author ID: 181475; ORCID: 0000-0002-9807-6841; e-mail: tsarichenko_s@mail.ru

ОСТРОВИЙ Александр Владимирович, директор, ООО «Аура», г. Москва, Российская Федерация; ORCID: 0000-0002-1730-2772; e-mail: ostrovoy@aura-uav.com

КАРАСЕВ Сергей Владимирович, начальник ОКБ, ООО «Аура», г. Москва, Российская Федерация; ORCID: 0000-0002-3162-5105; e-mail: karasev@aura-uav.com

ПУГАЧЕВ Максим Леонидович, аспирант кафедры комплексной безопасности в строительстве, Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет, г. Москва, Российская Федерация; ORCID: 0000-0002-9063-1265; e-mail: mika-1997@mail.ru.

sity), Moscow, Russian Federation; Author ID (Scopus): 181475; ORCID: 0000-0002-9807-6841; e-mail: tsarichenko_s@mail.ru

Aleksandr V. OSTROVOY, Director, “Aura” LLC, Moscow, Russian Federation; ORCID: 0000-0002-1730-2772; e-mail: ostrovoy@aura-uav.com

Sergey V. KARASEV, Head of Design Bureau, “Aura” LLC, Moscow, Russian Federation; ORCID: 0000-0002-3162-5105; e-mail: karasev@aura-uav.com

Maksim L. PUGACHEV, Postgraduate Student of Department of Integrated Safety in Civil Engineering, Moscow State University of Civil Engineering (National Research University), Moscow, Russian Federation; ORCID: 0000-0002-9063-1265; e-mail: mika-1997@mail.ru

Пожарная безопасность двухэтажных храмов

© В.И. Присадков¹, С.В. Муслакова¹✉, Д.В. Ушаков¹, А.А. Абашкин¹, К.В. Присадков²

¹ Всероссийский ордена «Знак Почета» научно-исследовательский институт противопожарной обороны Министерства Российской Федерации по делам гражданской обороны, чрезвычайным ситуациям и ликвидации последствий стихийных бедствий (Россия, 143903, Московская обл., г. Балашиха, мкр. ВНИИПО, 12)

² ООО «Центр проектно-сметных работ» (Россия, 600000, г. Владимир, ул. Большая Московская, 61)

АННОТАЦИЯ

Введение. Построенные в прошлые века двухэтажные храмы являются, как правило, памятниками истории и архитектуры. На первом этаже зданий располагается зимняя церковь, а на втором этаже — летняя церковь площадью от 80 до 200 м². Количество людей в верхней церкви может превышать 200 чел. Из верхней церкви в историческом здании обычно предусмотрен только один эвакуационный выход. При этом возможность устройства дополнительных выходов из храма отсутствует. Возникает противоречие между законодательством об охране памятников, которое не позволяет менять исторический облик зданий, и требованиями нормативных документов по пожарной безопасности, предусматривающими устройство нескольких выходов с этажа, если количество людей, одновременно находящихся в помещении, превышает 50 чел. Целью статьи является разработка предложений в нормативные документы, выполнение которых позволит увеличить допустимое количество людей в православной церкви с одним выходом свыше 50 чел.

Теоретические основы разработки предложений в нормативные документы. Применяемые сегодня методы гибкого нормирования требований пожарной безопасности позволяют гармонизировать требования законов, регламентирующих вопросы приспособления объектов культурного наследия для современного использования. Критерием пожарной безопасности двухэтажного храма является величина индивидуального пожарного риска. **Расчетное обоснование эффективности системы обеспечения пожарной безопасности.** Для обеспечения пожарной безопасности зданий двухэтажных храмов предложена система мероприятий, позволяющая на практике увеличить количество посетителей в верхних церквях свыше 50 чел. Рассмотрен пример действующего храма, демонстрирующий возможность увеличения количества людей в верхней церкви до 100 чел. Представлены результаты моделирования процесса эвакуации людей из верхней церкви.

Выводы. На примере расчета индивидуального пожарного риска для храма с одним выходом обосновано выполнение критерия пожарной безопасности. Сформулированы предложения для включения в нормативные документы с целью допущения нахождения в храмах с одним выходом более 50 чел.

Ключевые слова: объект культурного наследия; эвакуационный выход; критерий пожарной безопасности; индивидуальный пожарный риск; опасные факторы пожара

Для цитирования: Присадков В.И., Муслакова С.В., Ушаков Д.В., Абашкин А.А., Присадков К.В. Пожарная безопасность двухэтажных храмов // Пожаровзрывобезопасность/Fire and Explosion Safety. 2021. Т. 30. № 3. С. 65–75. DOI: 10.22227/0869-7493.2021.30.03.65-75

✉ Муслакова Светлана Витальевна, e-mail: msv-nika@yandex.ru

The fire safety of two-storey church buildings

© Vladimir I. Prisadkov¹, Svetlana V. Muslakova¹✉, Dmitriy V. Ushakov¹, Aleksandr A. Abashkin¹, Konstantin V. Prisadkov²

¹ All-Russian Research Institute for Fire Protection of Ministry of Russian Federation for Civil Defense, Emergencies and Elimination of Consequences of Natural Disasters (VNIPO, 12, Balashikha, Moscow Region, 143903, Russian Federation)

² Design and Estimate Center (Bolshaya Moskovskaya St., 61, Vladimir, 600000 Russian Federation)

ABSTRACT

Introduction. Two-storey church buildings, that date back to the past centuries, are usually regarded as monuments of history and architecture. Their facades cannot be changed when buildings are adapted for modern use. The ground floor of a church building is used as a warm winter church, and the first floor is an unheated summer church. The evacuation of church members from the ground floor in case of fire is organized in accordance with fire safety regulations. If the area of the upper church floor is 80...200 m² or more, the number of people may exceed 100 people there. As a rule, the upper church has one evacuation exit, which is contrary to the fire safety regulations, that prescribe the availability of several exits from the upper church floor when the number of people there exceeds fifty. The purpose of the article is to propose fire safety amendments in

respect of cultural heritage monuments, so that the acceptable number of people inside a church building, that has one exit, can exceed fifty.

Theoretical foundations of amendments to fire safety regulations. Methods of flexible fire safety control, applied today, allow for the regulatory harmonization of the requirements applicable to the adaptation of immovable cultural heritage for modern use. The level of individual risk is the fire safety criterion for a two-storey church building.

Substantiation of effectiveness of the fire safety system. A system of measures is proposed to ensure the fire safety of two-storey church buildings. The proposals will allow to increase the number of people on the first floor, so that it can exceed fifty. The case of a functional church is analyzed, which demonstrates methods of increasing the number of people inside it to one hundred. The results of modeling the process of evacuation from the upper church floor are presented.

Conclusions. An individual risk, arising in a church building that has one exit, is analyzed, and the implementation of the fire safety criterion is substantiated. Draft amendments to the fire safety regulations have been proposed, so that the number of people inside a church building, that has one exit, can exceed fifty.

Keywords: object of cultural heritage; emergency exit; fire safety criterion; individual risk; dangerous fire factors

For citation: Prasadkov V.I., Muslakova S.V., Ushakov D.V., Abashkin A.A., Prasadkov K.V. The fire safety of two-storey church buildings. *Pozharovzryvbezopasnost/Fire and Explosion Safety*. 2021; 30(3):65-75. DOI: 10.22227/0869-7493.2021.30.03.65-75 (rus).

✉ Svetlana Vitalyevna Muslakova, e-mail: msv-nika@yandex.ru

Введение

Среди охраняемых объектов культурного наследия народов России значительную часть составляют объекты религиозного назначения — культовые сооружения (соборы, храмы, церкви, мечети, синагоги, монастыри). Такие объекты уникальны не только как духовное и культурно-историческое наследие, но и как шедевры архитектуры. Вопрос обеспечения их пожарной безопасности актуален не только с точки зрения сохранения культовых зданий, а также в связи с тем, что большинство этих сооружений являются объектами с массовым пребыванием людей. Поэтому особую актуальность приобретают вопросы противопожарной защиты объектов религиозного назначения и техническое регулирование в части обеспечения их пожарной безопасности [1].

Как правило, ранее построенные православные церкви размещаются в зданиях, представляющих историческую ценность. Во внутренней отделке могут применяться перекрытия и перегородки из горючих материалов, имеющие большие пустоты. Многие моленные залы в церквях имеют световые фонари и антресоли. Высота помещений и наличие в них горючих предметов создают благоприятные условия для быстрого распространения пожара.

Экспертиза пожаров показывает, что причинами их возникновения и развития зачастую являются неисправная электропроводка, нарушение правил пожарной безопасности при проведении ремонтно-реставрационных работ, позднее обнаружение и сообщение о возгорании и, как следствие, быстрое распространение пожара на большой площади [2]. Инциденты с возгораниями в православных церквях, в католических костелах, в мечетях, в синагогах имеют обычно одинаковую природу и случаются с примерно равной вероятностью [3].

В России в XVIII–XIX веках получили широкое распространение двухэтажные каменные храмы,

сочетающие красоту здания и рационализм объемно-планировочных решений. На рис. 1–4 в качестве примеров представлены фотографии известных двухэтажных каменных храмов Московской и Владимирской областей.

На нижнем (первом) этаже располагается зимняя (отапливаемая) церковь. Ранее отопление в зданиях было в основном печное. Предусматривалась система вентиляции внутри кирпичных стен, обеспечивающая подачу горячего воздуха от печи по всему моленному залу. Как правило, моленный зал нижней церкви находился в высоком цоколе храма, имел низкий потолок и несколько выходов непосредственно наружу, если позволял рельеф местности. Зимняя церковь имела скромное убранство и не большой по высоте иконостас.

В сельской местности двухэтажные храмы строились как приходские, а в городах это были кафедральные или монастырские соборы. Верхний (второй) этаж предназначен для летней (парадной) церкви с высо-



Рис. 1. Церковь Владимирской иконы Божьей Матери (Рождества Христова) в усадьбе Быково Московской области

Fig. 1. Church of the Vladimir Icon of the Mother of God (Nativity of Christ) in Bykovo estate, Moscow region



Рис. 2. Николо-Архангельская церковь в селе Никольское Балашихинского района Московской области

Fig. 2. Church of St. Nicholas the Archangel in Nikolskoye village, Balashikha district, Moscow region

кими потолками и богатым убранством для проведения торжественных богослужений. Как правило, в верхнюю церковь ведут красивая парадная лестница и один широкий вход. На рис. 5 представлены планы первого и второго этажей храма.

Площадь для молитвы в верхней церкви (притвор, трапезная и средняя часть) может составлять от 80 до 200 м², что, согласно нормативным документам по пожарной безопасности (СП 258.1311500.2016¹, СП 388.1311500.2018²), указывает на расчетное количество людей в верхней церкви более 100 человек.

СП 258.1311500.2016, п. 4.2.7 определено, что помещение должно иметь не менее двух эвакуационных выходов, если суммарное количество людей, находящихся в нем и примыкающих помещениях (с эвакуационным выходом только через это помещение), составляет 50 и более человек. В результате, при эксплуатации двухэтажных храмов возникает вопрос обеспечения безопасной эвакуации людей из верхней церкви при пожаре. Количество людей в ней во время праздничного богослужения может превышать 200 человек. Из верхней церкви в храмах исторической постройки, как правило, предусмотрен только один эвакуационный выход. При этом возможность устройства дополнительных выходов из храма отсутствует.

¹ Объекты религиозного назначения. Требования пожарной безопасности : (СП 258.1311500.2016) : утвержден и введен в действие приказом Министерства Российской Федерации по делам гражданской обороны, чрезвычайным ситуациям и ликвидации последствий стихийных бедствий (МЧС России) от 23 ноября 2016 г. № 615.

² Объекты культурного наследия религиозного назначения. Требования пожарной безопасности : (СП 388.1311500.2018) : утвержден приказом Министерства Российской Федерации по делам гражданской обороны, чрезвычайным ситуациям и ликвидации последствий стихийных бедствий (МЧС России) от 13 августа 2018 г. № 332 и введен в действие с 14 января 2019 г.



Рис. 3. Троицкий собор в Свято-Троицком Никольском мужском монастыре в городе Гороховец Владимирской области

Fig. 3. Trinity Cathedral in the Holy Trinity St. Nicholas Monastery, Gorokhovets, Vladimir region

В пособии по проектированию и строительству православных храмов [4], опубликованном в 2003 г., в разделе противопожарные мероприятия допускается строительство двухэтажных храмов I–III степеней огнестойкости. При этом при количестве молящихся до 300 человек предлагается использовать один эвакуационный выход. Автор [4] обращает внимание также на то, что в праздничные и престольные дни количество людей в храме может увеличиваться до 200 %, что необходимо учитывать в расчетах путей эвакуации.

Церкви на два этажа проектировались и строились на сотни прихожан, а по действующим сводам правил они могут эксплуатироваться с количеством людей не более 50 человек.

Таким образом, возникает противоречие между законодательством об охране памятников, которое не позволяет менять исторический облик здания, и требованиями нормативных документов по пожар-



Рис. 4. Воскресенская церковь в селе Рошино Владимирской области

Fig. 4. Resurrection Church in Roschino, Vladimir region

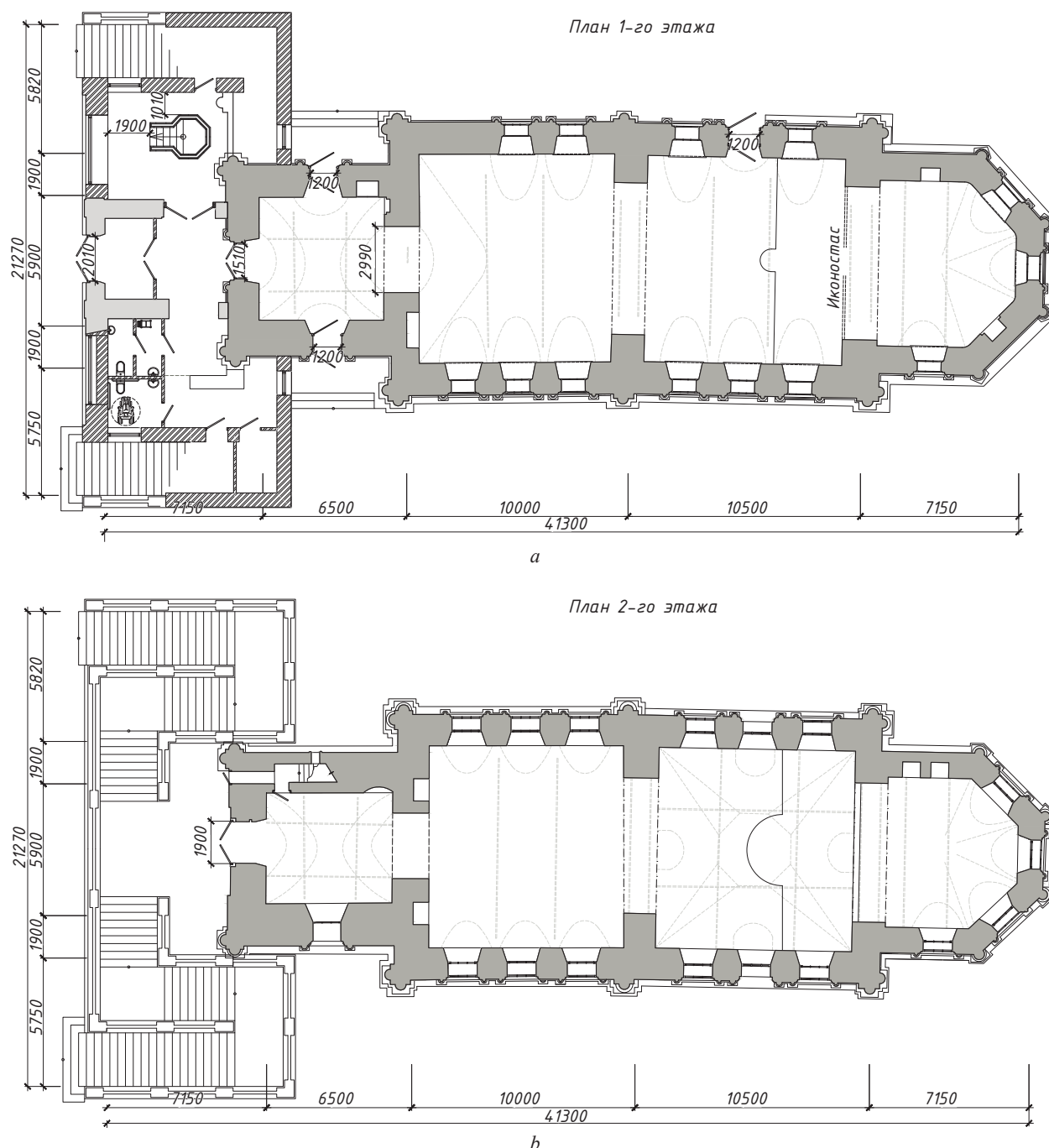


Рис. 5. Планы первого (а) и второго (б) этажей храма

Fig. 5. Plans of the first (a) and second (b) floors of a church building

ной безопасности, предусматривающими устройство нескольких выходов с этажа.

Целью статьи является разработка мероприятий, позволяющих безопасно эксплуатировать храмы исторической постройки с массовым пребыванием людей, и перечня предложений в нормативные документы по пожарной безопасности для объектов религиозного назначения, являющихся памятниками культурного наследия, выполнение которых позволит увеличить допустимое количество людей, одновременно находящихся в церкви с одним выходом более 50 человек.

Теоретические основы разработки предложений в нормативные документы

Требования по обеспечению пожарной безопасности к объектам капитального строительства, к числу которых сегодня относятся объекты культурного наследия исторической постройки, представляющие собой ценность с точки зрения истории, археологии, архитектуры, градостроительства, не всегда применяются в этих зданиях. Это обусловлено уникальностью архитектуры зданий, их внутренней отделки и, следовательно, необходимостью

их сохранения. Поэтому проводить какие-либо перепланировки в зданиях, выделять отсеки противопожарными преградами, расширять пути эвакуации, заменять горючие перегородки негорючими, устанавливать автоматические средства пожаротушения не везде возможно [4]. К решению задач по защите людей, художественных и материальных ценностей от пожаров на таких объектах необходимо подходить комплексно: рассматривать нормативно-правовые вопросы, инженерно-техническое обеспечение, организацию профилактики от пожаров и т.п.

Предложения по доработке нормативных документов должны обеспечивать безопасность людей в храме, отражать специфику размещения храма на втором уровне зданий, объемно-планировочные и конструктивные характеристики храма, возможность использования современных инженерных средств защиты зданий.

Критерием, подтверждающим достаточность соответствующей системы противопожарной защиты двухэтажного религиозного здания, является выполнение требований Федерального закона от 22.07.2008 № 123-ФЗ «Технический регламент о требованиях пожарной безопасности»³ (далее — ФЗ-123) по величине пожарного риска для людей в храме при пожаре или выполнении условий безопасной эвакуации людей из здания [4, 5].

Изложенные ниже результаты могут быть использованы как основа для включения в СП 258.1311500 дополнений⁴, позволяющих существенно увеличить вместимость исторических зданий, имеющих один эвакуационный выход, как это и было предусмотрено строителями храмов [6].

Время эвакуации, время от момента обнаружения пожара до завершения процесса эвакуации людей в безопасную зону (за пределы здания) не должно превышать необходимого времени эвакуации людей при пожаре.

Время эвакуации определяется по Методике определения расчетных величин пожарного риска⁵, и, согласно [7–11], как сумма времени начала эвакуации и расчетного времени эвакуации.

³ Технический регламент о требованиях пожарной безопасности: Федеральный закон Российской Федерации от 22 июня 2008 г. № 123-ФЗ принят Государственной Думой 4 июля 2008 г.; утвержден Советом Федерации 11 июля 2008 г.

⁴ Об объектах культурного наследия (памятниках истории и культуры) народов России: Федеральный закон Российской Федерации от 25 июня 2002 г. № 73-ФЗ принят Государственной Думой 24 мая 2002 г.; утвержден Советом Федерации 14 июня 2002 г.

⁵ Методика определения расчетных величин пожарного риска в зданиях, сооружениях и строениях различных классов функциональной пожарной опасности: утверждена приказом МЧС России от 30 июня 2009 г. № 382 (с изменениями, внесенными приказами МЧС России № 749 от 12 декабря 2011 г. и № 632 от 2 декабря 2015 г.).

Необходимое время эвакуации устанавливается путем численного моделирования динамики пожара в помещениях храмов при учете объемно-планировочных решений и характеристик пожарной нагрузки в помещениях, а также условий газообмена между помещениями и окружающей средой [12, 13]. В качестве временных характеристик эвакуации часто используются понятия: доступное время эвакуации (ASET) и требуемое время эвакуации (RSET), что эквивалентно, по сути, необходимому времени эвакуации и времени эвакуации. Условие безопасной эвакуации людей из здания обеспечено, если ASET больше RSET [8, 14, 15].

Указанные выше временные параметры используются также в Методике расчета индивидуального пожарного риска и в работах В.В. Холщевникова и Д.А. Самошина [8, 16].

Описанный в статье подход находится в рамках метода, известного в мире под названием «performance based design approach», а в России — гибкого или объектно-ориентированного нормирования [17–21]. Такой подход к проектированию системы защиты храмов базируется на компьютерном моделировании динамики опасных факторов пожара и людских потоков в здании [8, 16, 22, 23].

В качестве объекта исследования ниже будут рассмотрены вопросы безопасности людей при пожаре в двухуровневом соборе приходского храма в поселке городского типа на Урале, который имеет один выход из храма на втором этаже. На основе примера будут разработаны предложения по увеличению вместимости храмов, размещенных на втором этаже здания относительно действующих нормативных требований.

Таким образом, предложения по использованию храмов на втором уровне зданий с одним выходом будут подтверждены численным экспериментом по распространению опасных факторов пожара в помещениях храма на втором этаже и оценками характеристик процесса эвакуации людей из храма.

Расчетное обоснование эффективности системы обеспечения пожарной безопасности

Краткое описание объекта моделирования. Собор имеет габаритные размеры в плане 41,3 × 21,27 м (рис. 5, 6).

Стены собора выполнены из кирпича толщиной 640...1200 мм, что обеспечивает предел огнестойкости наружных стен здания первого этажа не менее R 150. Первый и второй этажи перекрыты историческими кирпичными сводами. Внутренняя отделка потолков — штукатурка под роспись. Полы первого этажа отделаны натуральным камнем. Полы второго этажа выполнены в виде дощатого настила по про-

гонам (выполняются с учетом несущей способности перекрытия). Между настилом и кирпичным сводом находится пространство для прокладки инженерных систем.

Нижний храм (см. рис. 5, *a*) имеет традиционное для приходских храмов четырехчастное

объемно-пространственное построение и состоит из алтарной части, храмового четверика, трапезной и притвора. Площадь помещений первого этажа — до 371 м². Материал иконостаса — дерево.

Над нижним храмом находится верхний храм (см. рис. 5, *b*). Как и нижний, он состоит из четырех

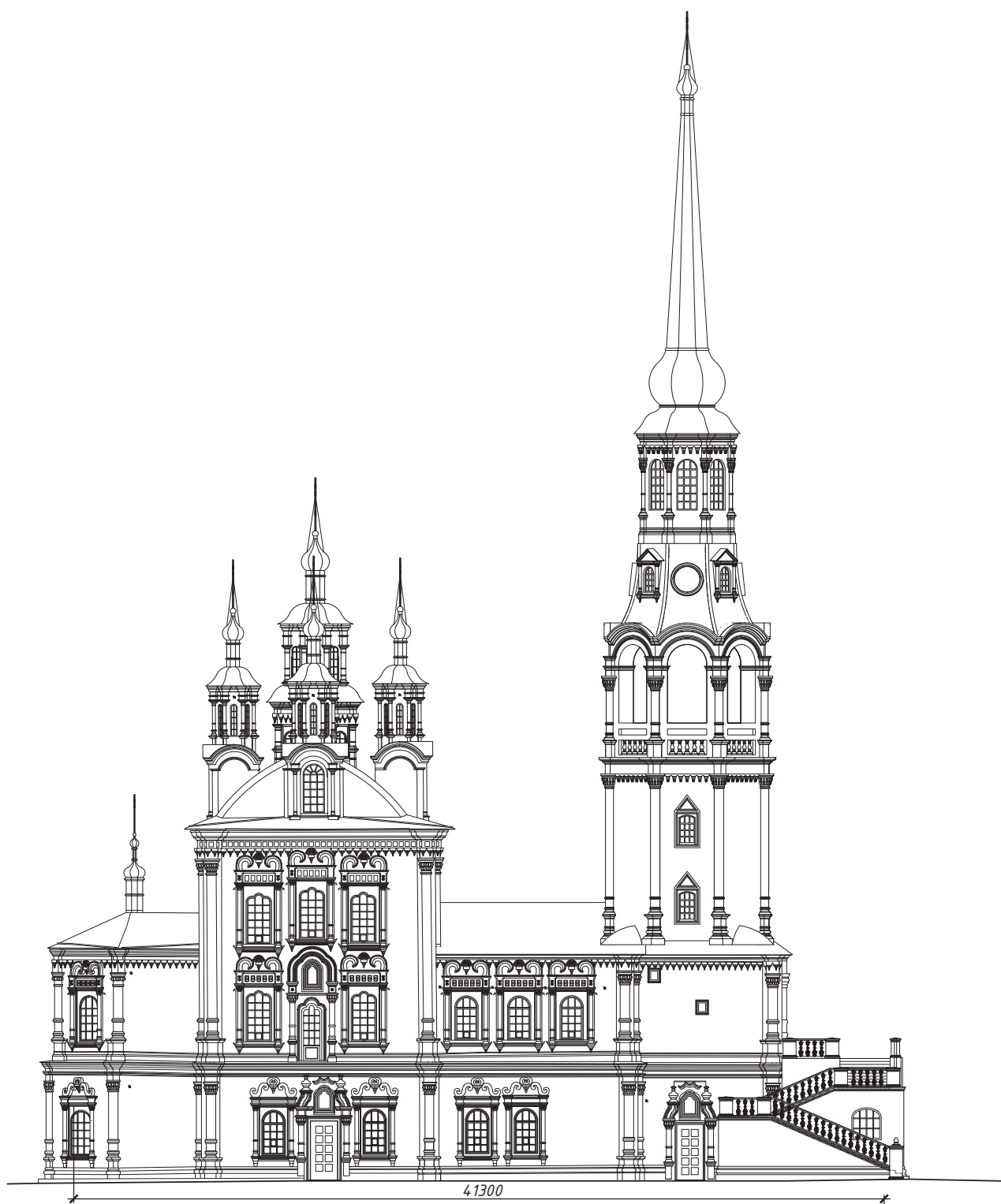


Рис. 6. Разрез двухэтажного храма

Fig. 6. The section of a two-storey church building

частей: алтаря, двусветного объема собственно храма, трапезной и сеней, расположенных над аналогичными частями нижнего храма и притвора. Фасады апсиды имеют по одному окну на каждой из ее пяти граней. Завершает алтарную часть декоративная двухъярусная главка.

Над четырехгранными сенями верхнего храма возвышается восьмигранная колокольня, увенчанная подобием усеченного этажа и шпилем.

Через помещение притвора верхнего храма обеспечен доступ на третий уровень колокольни через внутреннюю (в объеме стены) лестницу.

Площадь помещений второго этажа — до 243 м². Материал иконостаса — дерево.

Эвакуация людей с первого этажа площадью 371 м² предусмотрена по самостоятельным эвакуационным выходам, ведущим на уровень земли. Предусмотрено четыре выхода: один выход из холла, два выхода из притвора и четвертый выход из молельного зала.

Для эвакуации людей со второго этажа площадью 243 м² предусмотрен один эвакуационный выход шириной 1,8 м в свету на паперть с двумя открытыми лестницами с шириной марша не менее 1,4 м в свету. Максимальная длина пути эвакуации составляет 36,7 м.

Здание выполнено не ниже 2-й степени огнестойкости и класса конструктивной пожарной опасности не ниже С1.

Полы в холле и помещениях первого этажа сделаны из негорючих материалов.

Следует отметить, что архитекторы при проектировании и строительстве двухуровневых храмов видели опасность при пожаре для людей, находящихся на втором этаже и, как правило, предусматривали снаружи здания галереи для выхода с верхнего этажа. Например, наружные галереи были в свое время у храма Покрова на Нерли, в Дмитровском соборе во Владимире. В нижеприведенном примере храма на уровне второго этажа также была построена галерея, ныне не сохранившаяся.

Встречаются храмы с двумя эвакуационными выходами из притворов на втором этаже при устройстве одного неширокого прохода из трапезной в притвор, как это предусмотрено в храме села Рожино архитектором Львовым (ширина прохода около 2 м) (см. рис. 4).

Обоснование системы обеспечения пожарной безопасности двухэтажного храма.

1. Нижний и верхний храмы следует принять за отдельные пожарные отсеки с обособленными путями эвакуации.

2. Помещения собора необходимо защитить системой оповещения и управления эвакуацией людей при пожаре (СОУЭ) не ниже 3-го типа.

3. Оповещение требуется проводить одновременно по всем помещениям здания, в том числе на звоннице колокольни.

4. Необходимо обеспечить автоматическую передачу сигнала о пожаре в ближайшую пожарную часть МЧС России или на пульт централизованного наблюдения без участия работников объекта.

5. Следует провести огнезащиту кованых тяжелей здания до пределов огнестойкости R 45.

6. Не допускается размещения временной пожарной нагрузки в объеме колокольни, помещениях притвора первого этажа.

7. В помещениях второго этажа требуется выполнить следующие мероприятия:

- ограничить количество людей до 100 человек;
- ограничить временную пожарную нагрузку в помещениях притвора, апсиды и молельных залов до 5 МДж/м² (без учета иконостаса, мебели в алтаре и древесины полов);
- ограничить пожарную нагрузку от иконостаса в верхнем храме до 1000 кг в пересчете на стандартную древесину;
- дощатые полы в верхнем храме подвергнуть огнезащитной обработке по 1-й группе огнезащитной эффективности (при их наличии).

8. Пожарную нагрузку в виде мебели, перегородок из древесины, отделки из горючих материалов в помещениях притворов, молельных залов на первом и втором этажах здания не размещать.

9. Из молельных залов на первом этаже (отм. 0,000) предусмотреть не менее четырех эвакуационных выходов шириной не менее 1,2 м.

10. Объект необходимо оборудовать противодымной вентиляцией с естественным побуждением, в соответствии с требованиями Технического регламента, СП 7.13130⁶, СП 258.1311500.

11. В верхнем храме требуется предусмотреть противодымную вентиляцию через люки в центральном барабане, автоматически, дистанционно открывающиеся при пожаре на отметке не менее 18,000. Требуемую площадь открывания проемов установить общей площадью 1,5 м².

12. Необходимо обеспечить компенсационные расходы воздуха при пожаре в соответствии СП 7.13130.

13. Помещения молельных залов, притворов второго этажа следует защитить линейными дымовыми пожарными извещателями (ЛДПИ). Для снижения времени обнаружения загорания расстояние между оптическими осями ЛДПИ принять не бо-

⁶ Отопление, вентиляция и кондиционирование. Требования пожарной безопасности : (СП 7.13130.2013) : утвержден и введен в действие приказом Министерства Российской Федерации по делам гражданской обороны, чрезвычайным ситуациям и ликвидации последствий стихийных бедствий (МЧС России) от 21 февраля 2013 года № 116.

лее половины от нормативного при одноярусном расположении извещателей.

14. Помещения первого этажа необходимо защитить системой адресно-аналоговой пожарной сигнализации на дымовых пожарных извещателях.

15. В помещениях второго этажа требуется предусмотреть аварийное (эвакуационное) освещение.

Основные результаты расчетов индивидуального пожарного риска в храме. Ниже приведены основные результаты расчетов пожарного риска только для верхнего храма, как для отдельного пожарного отсека с обособленными путями эвакуации. Расчеты проводились по Методике определения расчетных величин пожарного риска в зданиях, сооружениях и строениях различных классов функциональной пожарной опасности, для количества людей в храме, равного 100 человек.

Мощность очага пожара, кВт/с:

$$Q = 0,019 t^2,$$

где t — время от момента возникновения пожара, с.

На основании проведенных расчетов установлено, что пожарный риск для верхнего храма составляет $Q_{в,2} = 0,259 \times 10^{-6}$ и не превышает допустимого значения, установленного [4].

На основе расчетов показано, что допустимое количество людей в верхнем храме составляет не более 100 человек (при принятых объемно-планировочных решениях для данного храма).

Предложения в нормативные документы по пожарной безопасности.

1. С учетом специфики устройства стен и перекрытий в объектах культурного наследия религиозного назначения верхний храм выделить в отдельный пожарный отсек.

2. Обеспечить автоматическую передачу сигнала о пожаре в ближайшую пожарную часть МЧС России или на пульт централизованного наблюдения без участия работников объекта.

3. Помещения собора защитить СОУЭ не ниже 3-го типа.

4. В помещениях второго этажа:

- ограничить временную пожарную нагрузку в помещениях притвора, апсиды и моленных залов до 5 МДж/м² (без учета иконостаса, мебели в алтаре и древесины полов);
- ограничить пожарную нагрузку от иконостаса в верхнем храме до 1000 кг в пересчете на стандартную древесину;
- дощатые полы в верхнем храме подвергнуть огнезащитной обработке по 1-й группе огнезащитной эффективности (при их наличии).

5. Пожарную нагрузку в виде мебели, перегородок из древесины, отделки из горючих материалов в помещениях притворов, моленных залов на втором этаже здания не размещать.

6. Объект оборудовать противодымной вентиляцией с естественным побуждением в соответствии с требованиями Технического регламента, СП 7.13130, СП 258.1311500.

До внесения уточнений в нормативные документы увеличение расчетного количества людей в храме с одним эвакуационным выходом должно быть согласовано с уполномоченным органом МЧС России.

Выводы

В статье на примере расчета индивидуального пожарного риска для конкретного храма обосновано выполнение критерия пожарной безопасности, что подтверждает эффективность разработанной системы противопожарной защиты храма. Сформулированы предложения, которые рекомендуется включить в нормативные документы по пожарной безопасности для объектов религиозного назначения с целью допущения нахождения в храмах-объектах культурного наследия с одним выходом более 50 человек.

1. Предложена система противопожарных мероприятий для храмов с одним эвакуационным выходом, учитывающая специфику объемно-планировочных и конструктивных решений храма, которую можно рассматривать как типовую для храмов с одним выходом.

2. Установлено расчетным путем, что для двухэтажных храмов при выполнении предложенной системы обеспечения пожарной безопасности допустимо увеличение количества молящихся в храме с одним выходом до 100 человек.

3. С учетом данных в статье обоснований предложенной системы обеспечения пожарной безопасности двухэтажного храма сформулированы нормативные требования для включения в действующие документы по пожарной безопасности.

4. Увеличение количества людей в храме относительно нормативных требований СП 1.13130.2020⁷ в два и более раз возможно на основе индивидуального подхода и строгого выполнения требований к системе обеспечения пожарной безопасности храма.

⁷ Системы противопожарной защиты. Эвакуационные пути и выходы : (СП 1.13130.2020) : утвержден и введен в действие приказом Министерства Российской Федерации по делам гражданской обороны, чрезвычайным ситуациям и ликвидации последствий стихийных бедствий (МЧС России) от 19 марта 2020 г. № 194.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Хасанов И.Р.* Особенности пожарной опасности объектов культурного наследия религиозного назначения // Пожарная безопасность/Fire Safety. 2018. № 2. С. 100–108.
2. *Сомов С.А., Мосолов А.С., Прус Ю.В.* О повышении эффективности противопожарной защиты объектов культурно-исторического наследия // Системы безопасности — 2011 : мат. двадцатой науч.-техн. конф. М. : Академия ГПС МЧС России, 2011. С. 206–208.
3. *Дмитрий А.* На линии огня // Журнал московской патриархии/Journal of the Moscow Patriarchate. 2012. № 6. С. 12–16.
4. *Кеслер М.Ю.* Православные храмы : в 3-х тт. Т. 2. Православные храмы и комплексы // Синописис/Synopsis. М. : ГУП ЦПП, 2003.
5. *Соболев А.* Законодательные основы пожарной безопасности культовых зданий и комплексов // Алгоритм безопасности/Safety algorithm. 2014. № 5. С. 14–17.
6. *Бондырев А.А., Гилетич А.Н., Присадков В.И., Барановский А.С., Соболев А.Н.* Критерии выбора рациональных вариантов систем противопожарной защиты храмовых комплексов // Пожарная безопасность. 2014. № 3. С. 112–115.
7. *Присадков В.И., Еремина Т.Ю., Тихонова Н.В.* Предпосылки разработки свода правил «Противопожарная защита объектов культурного наследия» // Пожаровзрывобезопасность/Fire and Explosion Safety. 2017. № 5. С. 45–53. DOI: 10.18322/PVB.2017.26.05.45-53
8. *Холщевников В.В.* Гносеология людских потоков : монография. М. : Академия ГПС МЧС России, 2019. 592 с.
9. *Schadschneider A., Klingsch W., Kluepfel H., Kretz T., Rogsch C., Seyfried A.* Evacuation dynamics: Empirical results, modeling and applications // Encyclopedia of complexity and system science. Springer, New York, 2009. Pp. 3142–3176. DOI: 10.1007/978-0-387-30440-3_187
10. *Lovreglio R., Kuligowski E., Gwynne S., Boyce K.* A pre-evacuation database for use in egress simulations // Fire Safety Journal. 2019. Vol. 105. Pp. 107–128. DOI: 10.1016/j.firesaf.2018.12.009
11. *Cooper L.Y.* A concept for estimating available safe egress time in fires // Fire Safety Journal. 1983. Vol. 5 (2). Pp. 135–144. DOI: 10.1016/0379-7112(83)90006-1
12. *McGrattan K., Hostikka S., McDermott R., Floyd J., Weinschenk C., Overholt K.* Fire dynamics simulator. Technical Reference Guide. Vol. 3: Validation. National Institute of Standards and Technology, 2015. 746 p.
13. *Heskestad G.* Fire plumes, flame height, and air entrainment // Handbook of Protection Engineering. 3rd Edition. Chapter 1. Springer, New York, 2016. Pp. 2–1, 2–17. DOI: 10.1007/978-1-4939-2565-0_13
14. *Schröder B., Arnold L., Seyfried A.* A map representation of the ASET-RSET concept // Fire Safety Journal. 2020. Vol. 115. P. 103154. DOI: 10.1016/j.firesaf.2020.103154
15. *Poon S.* A dynamic approach to aset/rset assessment in performance based design // Procedia Engineering. 2014. Vol. 71. Pp. 173–181. DOI: 10.1016/J.PROENG.2014.04.025
16. *Холщевников В.В., Самошин Д.А., Парфененко А.П., Кудрин И.С., Истратов Р.Н., Белосохов И.Р.* Эвакуация и поведение людей при пожарах. М. : Академия ГПС МЧС России, 2009. С. 212.
17. *Hurley M.J., Rosenbaum E.R.* Performance-based design // SFPE Handbook of Fire Protection Engineering. 5th ed. / M. Hurley (ed.). Society of Fire Protection Engineers, 2016. DOI: 10.1007/978-1-4939-2565-0
18. *Gwynnee S., Boyce K.* Engineering data // SFPE Handbook of Fire Protection Engineering. 5th ed. / M. Hurley (ed.). Society of Fire Protection Engineers, 2016. DOI: 10.1007/978-1-4939-2565-0
19. RiMEA. Guideline for Microscopic Evacuation Analysis. RiMEA e.V., 2016, Version 3.0.0.
20. *McGrattan K., Hostikka S., McDermott R., Floyd J., Vanella M.* Fire dynamics simulator user's guide. 6th ed. National Institute of Standards and Technology, 2019.
21. *Schröder B.* Multivariate methods for life safety analysis in case of fire : Ph.D. thesis. Universitätsbibliothek Wuppertal, 2017.
22. *Gwynnee S.M., Rosenbaum E.R.* Employing the hydraulic model in assessing emergency movement // SFPE Handbook of Fire Protection Engineering. 5th ed. / M. Hurley (ed.). Society of Fire Protection Engineers, 2016. DOI: 10.1007/978-1-4939-2565-0
23. *Krause D., Thornig P.* JURECA: modular supercomputer at Jülich supercomputing centre // Journal of large-scale research facilities. 2018. Vol. 4. A132. DOI: 10.17815/jlsrf-4-121-1.

REFERENCES

1. Khasanov I.R. Fire danger features of cultural heritage objects of religious appointment. *Pozharnaya bezopasnost/Fire Safety*. 2018; 2:100-108. (rus).
2. Somov S.A., Mosolov A.S., Prus Y.V. On improving the effectiveness of fire protection of cultural and historical heritage objects. *Security Systems — 2011 : Materials of the XX Scientific and technical conference*. Moscow, Academy of State Fire Service of the Ministry of Emergency Situations of Russia. 2011; 206-208. (rus).
3. Dmitry A. On the line of fire. *Jurnal Moskovskoy Patriarkhii/Journal of the Moscow Patriarchate*. 2012; 6:12-16. (rus).
4. Kesler M.Y. Orthodox churches. In three volumes. Vol. 2. Orthodox churches and complexes. *Synopsis/Synopsis*. Moscow, GUP CPP, 2003. (rus).
5. Sobolev A. Legislative bases of fire safety of religious buildings and complexes. *Algoritm bezopasnosti/Safety algorithm*. 2014; 5:14-17. (rus).
6. Bondyrev A.A., Gilelich A.N., Prisdakov V.I., Baranovskiy A.S., Sobolev A.N. The choice criteria of rational options of fire protection systems for temple complexes. *Pozharnaya bezopasnost/Fire safety*. 2017; 3:112-115. (rus).
7. Prisdakov V.I., Eremina T.U., Tikhonova N.V. Development basis for code of practice "Fire protection of cultural heritage objects". *Pozharovzryvbezopasnost/Fire and Explosion Safety*. 2017; 5:45-53. DOI: 10.18322/PVB.2017.26.05.45-53 (rus).
8. Kholshcheynikov V.V. *Epistemology of human flows : monograph*. Moscow, Academy of State Fire Service of the Ministry of Emergency Situations of Russia, 2019; 592. (rus).
9. Schadschneider A., Klingsch W., Kluepfel H., Kretz T., Rognsch C., Seyfried A. *Evacuation dynamics: Empirical results, modeling and applications*. Encyclopedia of complexity and system science. Springer, New York, 2009; 3142-3176. DOI: 10.1007/978-0-387-30440-3_187
10. Lovreglio R., Kuligowski E., Gwynne S., Boyce K. A pre-evacuation database for use in egress simulations. *Fire Safety Journal*. 2019; 105:107-128. DOI: 10.1016/j.firesaf.2018.12.009
11. Cooper L.Y. A concept for estimating available safe egress time in fires. *Fire Safety Journal*. 1983; 5(2):135-144. DOI: 10.1016/0379-7112(83)90006-1
12. McGrattan K., Hostikka S., McDermott R., Floyd J., Weinschenk C., Overholt K. *Fire Dynamics Simulator. Technical Reference Guide*. Vol. 3: Validation. National Institute of Standards and Technology, 2015; 746.
13. Heskestad G. *Fire plumes, flame height, and air entrainment*. Handbook of Protection Engineering. 3rd Edition. Chapter 1. Springer, New York, 2016; 2-1, 2-17. DOI: 10.1007/978-1-4939-25650_13
14. Schröder B., Arnold L., Seyfried A. A map representation of the ASET-RSET concept. *Fire Safety Journal*. 2020; 115:103154. DOI:10.1016/j.firesaf.2020.103154
15. Poon S. A dynamic approach to aset/rset assessment in performance based design. *Procedia Engineering*. 2014; 71:173-181. DOI: 10.1016/J.PROENG.2014.04.025
16. Kholshcheynikov V.V., Samoshin D.A., Parfenenko A.P., Kudrin I.S., Istratov R.N., Belosokhov I.R. *Evacuation and behavior of people during fires*. Moscow, Academy of State Fire Service of the Ministry of Emergency Situations of Russia, 2009; 212. (rus).
17. Hurley M.J., Rosenbaum E.R. Performance-based design. *SFPE Handbook of Fire Protection Engineering*. 5th ed.; M. Hurley (ed.). Society of Fire Protection Engineers, 2016. DOI: 10.1007/978-1-4939-2565-0 book section 37.
18. Gwynnee S., Boyce K. Engineering data. *SFPE Handbook of Fire Protection Engineering*. 5th ed. ; M. Hurley (ed.). Society of Fire Protection Engineers, 2016. DOI: 10.1007/978-1-4939-2565-0 book section 64
19. RiMEA. *Guideline for Microscopic Evacuation Analysis*. RiMEA e. V., 2016, Version 3.0.0.
20. McGrattan K., Hostikka S., McDermott R., Floyd J., Vanella M. *Fire Dynamics Simulator User's Guide*. 6th ed. National Institute of Standards and Technology, 2019.
21. Schroder B. *Multivariate methods for life safety analysis in case of fire* : Ph.D. thesis. Universitätsbibliothek Wuppertal, 2017.
22. Gwynne S.M., Rosenbaum E.R. Employing the hydraulic model in assessing emergency movement. *SFPE Handbook of Fire Protection Engineering*. 5th ed.; M. Hurley (ed.). Society of Fire Protection Engineers, 2016. DOI: 10.1007/978-1-4939-2565-0
23. Krause D., Thornig P. JURECA: modular supercomputer at Jülich supercomputing centre. *Journal of large-scale research facilities*. 2018; 4:A132. DOI: 10.17815/jlsrf-4-121-1

Поступила 17.02.2021, после доработки 27.04.2021; принята к публикации 11.05.2021
Received February 17, 2021; Received in revised form March 27, 2021; Accepted May 11, 2021

Информация об авторах

ПРИСАДКОВ Владимир Иванович, д-р техн. наук, профессор, главный научный сотрудник, Всероссийский ордена «Знак Почета» научно-исследовательский институт противопожарной обороны Министерства Российской Федерации по делам гражданской обороны, чрезвычайным ситуациям и ликвидации последствий стихийных бедствий, г. Балашиха, Российская Федерация; РИНЦ ID: 760543; ORCID: 0000-0002-2161-0794; e-mail: vniipo@mail.ru

МУСЛАКОВА Светлана Витальевна, канд. техн. наук, ведущий научный сотрудник отдела моделирования пожаров и нестандартного проектирования, Всероссийский ордена «Знак Почета» научно-исследовательский институт противопожарной обороны Министерства Российской Федерации по делам гражданской обороны, чрезвычайным ситуациям и ликвидации последствий стихийных бедствий, г. Балашиха, Российская Федерация; ORCID: 0000-0002-6146-8059; e-mail: msv-nika@yandex.ru

УШАКОВ Дмитрий Викторович, начальник отдела моделирования пожаров и нестандартного проектирования, Всероссийский ордена «Знак Почета» научно-исследовательский институт противопожарной обороны Министерства Российской Федерации по делам гражданской обороны, чрезвычайным ситуациям и ликвидации последствий стихийных бедствий, г. Балашиха, Российская Федерация; РИНЦ ID: 751772; ORCID: 0000-0003-2275-296X; e-mail: vniipo@mail.ru

АБАШКИН Александр Анатольевич, заместитель начальника отдела моделирования пожаров и нестандартного проектирования, Всероссийский ордена «Знак Почета» научно-исследовательский институт противопожарной обороны Министерства Российской Федерации по делам гражданской обороны, чрезвычайным ситуациям и ликвидации последствий стихийных бедствий, г. Балашиха, Российская Федерация; ORCID: 0000-0002-6347-3257; e-mail: vniipo@mail.ru

ПРИСАДКОВ Константин Владимирович, главный инженер, ООО «Центр проектно-сметных работ», г. Владимир, Российская Федерация; ORCID: 0000-0002-8307-7083; e-mail: z080637@yandex.ru

Information about the authors

Vladimir I. PRISADKOV, Dr. Sci. (Eng.), Professor, Main Researcher, All-Russian Research Institute for Fire Protection of Ministry of Russian Federation for Civil Defense, Emergencies and Elimination of Consequences of Natural Disasters, Balashikha, Russian Federation; ID RISC: 760543; ORCID: 0000-0002-2161-0794; e-mail: vniipo@mail.ru

Svetlana V. MUSLAKOVA, Cand. Sci. (Eng.), Leading Researcher of Department of Fire Modeling and Non-Standard Design, All-Russian Research Institute for Fire Protection of Ministry of Russian Federation for Civil Defense, Emergencies and Elimination of Consequences of Natural Disasters, Balashikha, Russian Federation; ORCID: 0000-0002-6146-8059; e-mail: msv-nika@yandex.ru

Dmitriy V. USHAKOV, Head of Department of Fire Modeling and Non-Standard Design, All-Russian Research Institute for Fire Protection of Ministry of Russian Federation for Civil Defense, Emergencies and Elimination of Consequences of Natural Disasters, Balashikha, Russian Federation; ID RISC: 751772; ORCID: 0000-0003-2275-296X; e-mail: vniipo@mail.ru

Aleksandr A. ABASHKIN, Deputy Head of Department of Fire Modeling and Non-Standard Design, All-Russian Research Institute for Fire Protection of Ministry of Russian Federation for Civil Defense, Emergencies and Elimination of Consequences of Natural Disasters, Balashikha, Russian Federation; ORCID: 0000-0002-6347-3257; e-mail: vniipo@mail.ru

Konstantin V. PRISADKOV, Chief Engineer, Design and Estimate Center, Vladimir, Russian Federation; ORCID: 0000-0002-8307-7083; e-mail: z080637@yandex.ru

Новый подход к расчету времени блокирования путей эвакуации по потере видимости в дыму при пожаре в помещении

© С.В. Пузач¹✉, В.М. Мустафин^{1,2}, Р.Г. Акперов¹

¹ Академия Государственной противопожарной службы Министерства Российской Федерации по делам гражданской обороны, чрезвычайным ситуациям и ликвидации последствий стихийных бедствий (Россия, 129366, г. Москва, ул. Бориса Галушкина, 4)

² Академия гражданской защиты им. М. Габдуллина МЧС Республики Казахстан (Республика Казахстан, 020000, г. Кокшетау, ул. Акан Серз, 136)

АННОТАЦИЯ

Введение. Точность расчета дальности видимости при пожаре в помещении существенно зависит от величины дымообразующей способности веществ и материалов, полученной экспериментально в маломасштабных установках. Поэтому для нахождения дальности видимости в полномасштабном помещении актуальной задачей является разработка метода расчета, позволяющего учесть масштабный фактор и не использующего удельный коэффициент дымообразования.

Цели и задачи. Целью данной работы является разработка нового подхода к расчету времени блокирования путей эвакуации по потере видимости, учитывающего масштабный фактор и не использующего удельный коэффициент дымообразования. Для ее достижения проведен анализ схем развития пожара в маломасштабном и полномасштабном помещениях, для этих схем получены теоретические зависимости среднеобъемной оптической плотности дыма от других среднеобъемных параметров газовой среды помещения и выполнено сравнение результатов расчетов по полученным зависимостям с экспериментальными данными.

Методы. Решение нестационарных уравнений законов сохранения энергии газовой среды в помещении, оптической плотности дыма и массы кислорода при закрытой и открытой схемах теплообмена в помещении. Проведение огневых испытаний в маломасштабной установке. Сравнение теоретических и экспериментальных данных.

Результаты. Получены аналитические зависимости среднеобъемной оптической плотности дыма от изменения среднеобъемной температуры и среднеобъемной парциальной плотности кислорода для закрытой и открытой схем протекания пожара в помещении. Проведена серия огневых испытаний кабелей ВВГнг при различной плотности падающего на образец теплового потока. Получены экспериментальные зависимости от времени оптической плотности дыма и удельного коэффициента дымообразования. Выполнено сравнение результатов расчета среднеобъемной оптической плотности дыма по предложенным аналитическим выражениям с экспериментальными данными.

Выводы. Предлагается использовать экспериментальные зависимости среднеобъемной оптической плотности дыма от изменения среднеобъемной температуры или среднеобъемной парциальной плотности кислорода, полученные в маломасштабной установке, не решая дифференциального уравнения закона сохранения оптической плотности дыма.

Ключевые слова: дымообразующая способность; коэффициент дымообразования; оптическая плотность дыма; горение; дальность видимости

Для цитирования: Пузач С.В., Мустафин В.М., Акперов Р.Г. Новый подход к расчету времени блокирования путей эвакуации по потере видимости в дыму при пожаре в помещении // Пожаровзрывобезопасность/Fire and Explosion Safety. 2021. Т. 30. № 3. С. 76–87. DOI: 10.22227/0869-7493.2021.30.03.76-87

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

A new approach to calculating the time to the blocking of the escape routes due to the loss of visibility in the smoke of an indoor fire

© Sergey V. Puzach¹✉, Valikhan M. Mustafin^{1,2}, Ruslan G. Akperov¹

¹ The State Fire Academy of the Ministry of Russian Federation for Civil Defense, Emergencies and Elimination on Consequences of Natural Disasters (Boris Galushkina St., 4, Moscow, 129366, Russian Federation)

²Academy of Civil Protection. M. Gabdullina Ministry of Emergency Situations of the Republic of Kazakhstan (Akan Sera St., 136, Kokshetau, 020000, Republic of Kazakhstan)

ABSTRACT

Introduction. The accuracy of the visibility analysis in the event of an indoor fire strongly depends on the smoke-generating ability of substances and materials obtained experimentally in small-scale units. Therefore, the task is to develop a method of analysis that takes account of the scale factor and does not use the specific coefficient of smoke generation to identify the range of visibility in a full-scale room.

Goals and objectives. The goal of the research project is a new approach to the calculation of the time to the blocking of the escape routes due to the loss of visibility with due regard for the scale factor and without regard for the specific coefficient of smoke generation.

To achieve this goal, the analysis of fire development patterns in small-scale and full-scale rooms was carried out; theoretical dependences between the volumetric average optical smoke density and other volumetric average parameters of the indoor gas environment were obtained for these patterns, and calculation results, based on the obtained dependences, were compared with the experimental data.

Methods. Methods, employed by the co-authors, included solving non-stationary equations based on the principle of conservation of indoor gas energy, optical density of smoke and oxygen mass for the cases of closed and open-type indoor heat and mass transfer. Fire tests were conducted in a small-scale facility. Theoretical and experimental data were compared.

Results. Analytical dependences between the volumetric average optical density of smoke, a change in the volumetric average temperature, and the volumetric average partial oxygen density for closed and open indoor fire patterns were obtained.

The series of fire tests involving the PVC insulated and sheathed bare (coverless) cable, exposed to the effect of the varying density incident heat flux, were carried out. Experimental dependences between the time, the optical density of smoke, and the specific coefficient of smoke generation were obtained.

The obtained volumetric average optical density of smoke was compared with the experimental data using the proposed analytical expressions.

Conclusions. The co-authors suggest using experimental dependences between the volumetric average optical density of smoke, changes in the volumetric average temperature or the volumetric average partial oxygen density obtained in a small-scale facility without solving the differential equation based on the principle of conservation of optical density of smoke.

Keywords: smoke generation ability; smoke generation coefficient; optical density of smoke; burning; visibility range

For citation: Puzach S.V., Mustafin V.M., Akperov R.G. A new approach to calculating the time to the blocking of the escape routes due to the loss of visibility in the smoke of an indoor fire. *Pozharovzryvobezopasnost/ Fire and Explosion Safety*. 2021; 30(3):76-87. DOI: 10.22227/0869-7493.2021.30.03.76-87 (rus).

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

Введение

Математическое моделирование термогазодинамики пожара позволяет оценить степень опасности нахождения человека в здании [1–7]. Согласно работам [8–12], в большинстве случаев снижение видимости в дыму достигает критических значений раньше других опасных факторов пожара.

Точность расчета дальности видимости существенно зависит от величины дымообразующей способности [8, 13, 14] веществ и материалов, полученной экспериментально. Дымообразующая способность, в свою очередь, зависит от химического состава и физических параметров пожарной нагрузки [11, 15], а также на данный показатель существенно влияют параметры газовой среды помещения и количество окислителя [13, 16–18].

В России при расчете времени блокирования путей эвакуации опасными факторами пожара используется база данных типовой пожарной нагрузки [8]. Однако для большинства современных веществ и материалов такие данные отсутствуют.

Кроме того, значения коэффициента дымообразования, получаемые стандартным методом (по ГОСТ 12.1.044–89¹, п. 4.18), используемым при сертификации, существенно отличаются от значений, приведенных в базе данных [8]. Поэтому повышение качества проведения огневых испытаний по определению дымообразующей способности веществ и материалов, надежность измерительного оборудования и методов обработки полученных результатов являются актуальными и достаточно сложными научными задачами.

Вышеуказанные испытания проводятся в маломасштабных экспериментальных установках. Для использования полученных данных при расчете оптической плотности дыма в полномасштабном реальном помещении необходимо в первую очередь учитывать

¹ ГОСТ 12.1.044–89. Система стандартов безопасности труда. Пожаровзрывоопасность веществ и материалов. Номенклатура показателей и методы их определения: утвержден и введен в действие постановлением Государственного комитета СССР по управлению качеством продукции и стандартам от 12 декабря 1989 г. № 3683.

масштабный фактор. Однако научного обоснования такого подхода в литературных источниках нет.

Целью работы является разработка нового подхода к расчету времени блокирования путей эвакуации по потере видимости, учитывающего масштабный фактор и не использующего удельный коэффициент дымообразования.

Для достижения цели необходимо решить следующие задачи:

- провести анализ схем развития пожара в маломасштабном и полномасштабном помещениях;
- получить для этих схем теоретические зависимости среднеобъемной оптической плотности дыма от других среднеобъемных параметров газовой среды помещения;
- сравнить результаты расчетов по полученным зависимостям с экспериментальными данными.

Зависимости среднеобъемной оптической плотности дыма от изменения среднеобъемной температуры и среднеобъемной парциальной плотности кислорода

Рассмотрим две схемы термогазодинамики пожара:

- горение в условно герметичном объеме (маломасштабные экспериментальные установки для получения параметров процесса горения веществ и материалов (закрытая термодинамическая система [12, 15]) или полномасштабные помещения с малой величиной проемности);
- проемы помещения работают только на выброс газа наружу (начальная стадия пожара в полномасштабном помещении или маломасштабные экспериментальные установки для получения параметров процесса горения веществ и материалов (открытая термодинамическая система [12, 15])).

В условно герметичном объеме законы сохранения энергии, оптической плотности дыма и массы кислорода соответственно имеют вид [8]:

$$V \frac{d}{dt}(\rho_m c_p T_m) = \eta \Psi Q_H^p (1 - \varphi); \quad (1)$$

$$V \frac{d\mu_m}{dt} = D_m \Psi; \quad (2)$$

$$V \frac{d\rho_{O_2m}}{dt} = -\eta \Psi L_{O_2}, \quad (3)$$

где τ — время, с;

T_m — среднеобъемная температура, К;

c_p — удельная изобарная теплоемкость газовой среды, Дж/(кг·К);

ρ_m — среднеобъемная парциальная плотность газовой среды, кг/м³;

η — полнота сгорания;

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

Q_H^p — низшая рабочая теплота сгорания горючего материала, Дж/кг;

φ — коэффициент теплопотерь от газовой среды объема в его стенки;

μ_m — среднеобъемная оптическая плотность дыма, Нп/м;

D_m — удельный коэффициент дымообразования горючего материала, Нп·м²/кг;

ρ_{O_2m} — среднеобъемная парциальная плотность кислорода, кг/м³;

L_{O_2} — удельный коэффициент потребления кислорода.

Совместно решая уравнения (1) и (2) и учитывая, что в герметичном объеме $\rho_m \approx \rho_a$, можно получить зависимость среднеобъемной оптической плотности дыма от изменения среднеобъемной температуры:

$$\mu_m = K_1 (T_m - T_a), \quad (4)$$

где $K_1 = D_m \rho_a c_p / \eta Q_H^p (1 - \varphi)$ — коэффициент пропорциональности, Нп/(м·К);

ρ_a — плотность воздуха в объеме перед горением, кг/м³;

T_a — температура воздуха в объеме перед горением, К.

После совместного решения уравнений (2) и (3) получаем зависимость среднеобъемной оптической плотности дыма от изменения среднеобъемной парциальной плотности кислорода:

$$\mu_m = K_2 (\rho_{O_2a} - \rho_{O_2m}), \quad (5)$$

где $K_2 = D_m / \eta L_{O_2}$ — коэффициент пропорциональности, Нп·м²/кг;

ρ_{O_2a} — среднеобъемная парциальная плотность кислорода в воздухе, кг/м³.

Из уравнений (4) и (5) видно, что величина среднеобъемной оптической плотности дыма прямо пропорциональна изменениям среднеобъемной температуры и среднеобъемной парциальной плотности кислорода, а также она не зависит от размеров помещения. Поэтому зависимости (4) и (5) могут использоваться при расчете как в маломасштабном, так и в полномасштабном помещении.

В случае аналитического решения интегральной модели, когда проемы работают только на выброс газовой среды помещения наружу, аналитические решения на основе законов сохранения энергии для оптической плотности дыма и массы кислорода соответственно имеют вид [8]:

$$\frac{T_m}{T_a} = \exp\left(\frac{A}{B} \tau^n\right); \quad (6)$$

$$\mu_m = \mu_* \left[1 - \exp\left(-\frac{A}{B} \tau^n\right) \right]; \quad (7)$$

$$\rho_{O_2m} = \frac{B\eta L_{O_2}}{V} \left\{ \left(1 + \frac{V}{B\eta L_{O_2}} \rho_{O_2a} \right) \exp \left[-\frac{A}{B} \tau^n \right] - 1 \right\}, (8)$$

где $\mu_* = c_p \rho_a T_a D_m / \eta (1 - \phi) Q_H^P$ — характерная оптическая плотность, Нп/м;

$B = c_p \rho_0 T_0 V / \eta Q_H^P (1 - \phi)$ — размерный комплекс, кг;

n — показатель степени, зависящий от вида горючего материала (твердый или жидкий) и характера процесса выгорания;

A — размерный комплекс, зависящий от вида горючего материала (твердый или жидкий) и характера процесса выгорания, кг/сⁿ.

Совместно решая уравнения (6) и (7), можно получить зависимость среднеобъемной оптической плотности дыма от относительного изменения среднеобъемной температуры:

$$\mu_m = K_3 \left[\frac{T_m - T_a}{T_m} \right], (9)$$

где $K_3 = \mu_* = c_p \rho_a T_a D_m / \eta (1 - \phi) Q_H^P$ — коэффициент пропорциональности, Нп/м;

ρ_a — плотность воздуха в объеме перед горением, кг/м³;

T_a — температура воздуха в объеме перед горением, К.

В результате совместного решения уравнений (7) и (8) можно получить зависимость среднеобъемной оптической плотности дыма от изменения среднеобъемной парциальной плотности кислорода:

$$\mu_m = K_4 (\rho_{O_2a} - \rho_{O_2m}), (10)$$

где $K_4 = \mu_* / B\eta L_{O_2} / V + \rho_{O_2a}$ — коэффициент пропорциональности, Нп·м²/кг.

Из уравнений (9) и (10) видно, что величина среднеобъемной оптической плотности дыма прямо пропорциональна относительному изменению среднеобъемной температуры и изменению среднеобъемной парциальной плотности кислорода. Поэтому зависимости (9) и (10) могут использоваться при расчете как в маломасштабном, так и в полномасштабном помещении.

Таким образом, в рассматриваемых схемах термогазодинамики пожара величину среднеобъемной оптической плотности дыма можно рассчитывать, не решая уравнение закона ее сохранения.

Для экспериментальной проверки прямой пропорциональности величины среднеобъемной оптической плотности дыма от изменения среднеобъемной температуры и среднеобъемной парциальной плотности кислорода были проведены экспериментальные исследования на маломасштабной установке [12, 15].

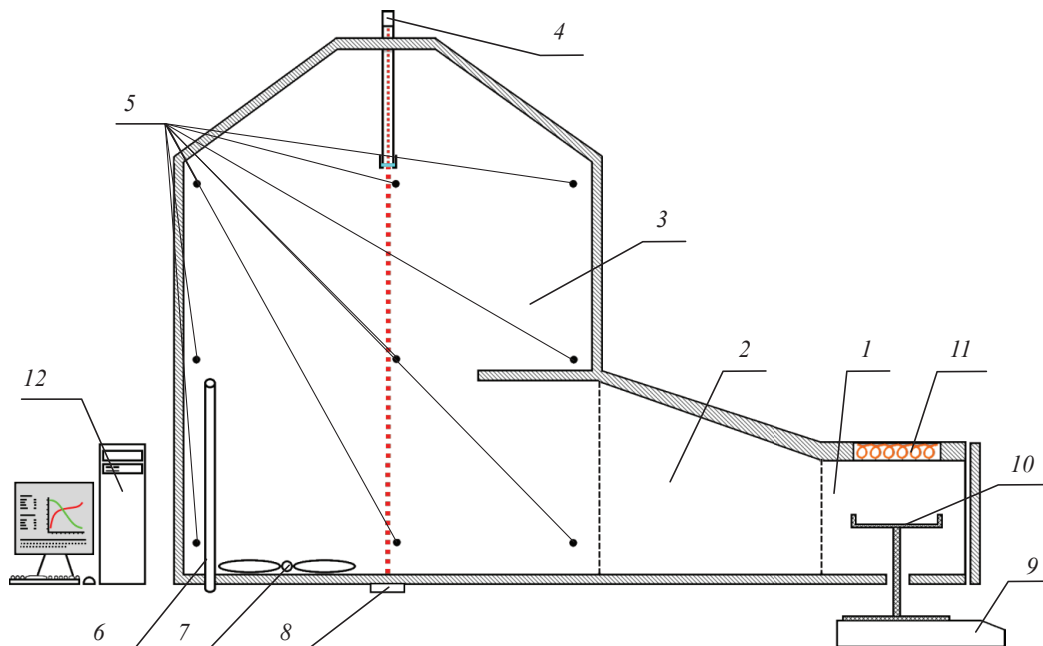


Рис. 1. Схема модифицированной экспериментальной установки [12, 15]: 1 — камера сгорания; 2 — переходной рукав; 3 — экспозиционная камера; 4 — лазерный модуль; 5 — термопары; 6 — зонд отбора газа; 7 — вентилятор; 8 — фоточувствительный элемент; 9 — электронные весы; 10 — держатель образца; 11 — электронагревательный излучатель; 12 — регистрирующая аппаратура

Fig. 1. The diagram of a modified experimental facility [12, 15]: 1 — combustion chamber; 2 — adapter hose; 3 — exposure chamber; 4 — laser module; 5 — thermocouples; 6 — a gas extraction probe; 7 — fan; 8 — photosensitive element; 9 — electronic scales; 10 — sample holder; 11 — electric heating emitter; 12 — recording equipment

Описание экспериментальной установки и исходных данных при проведении огневых испытаний

Коэффициент дымообразования строительных и отделочных материалов определяется с использованием стандартного метода (по ГОСТ 12.1.044–89, п. 4.18). Однако данный метод имеет ряд существенных недостатков [15]. Поэтому в целях определения коэффициента дымообразования, необходимого для расчета времени блокирования путей эвакуации по потере видимости в дыму на объектах энергетики, используем модифицированную экспериментальную установку [12, 15], схема которой представлена на рис. 1.

Согласно работам [17, 19], в зависимости от размеров помещения и типа горючего материала при проведении огневых испытаний могут создаваться различные по величине тепловые потоки. Также считается, что при среднем пожаре величина теплового потока, падающего на образец, составляет 35 кВт/м^2 [17, 19]. Используемая установка позволяет проводить огневые испытания при различной плотности падающего на образец теплового потока.

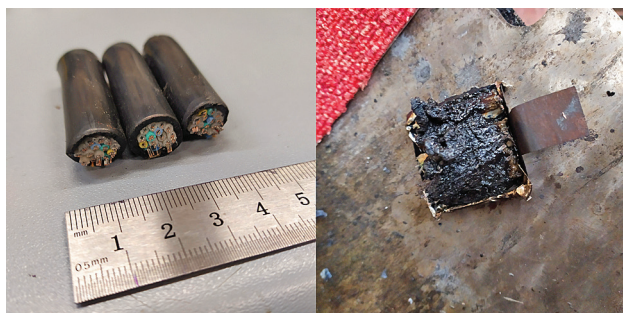


Рис. 2. Образцы кабеля ВВГнг для проведения огневых испытаний с площадью обогрева $S_0 = 16 \text{ см}^2$

Fig. 2. Samples of the PVC insulated and sheathed bare (coverless) cable used in the fire tests with a heating area of $S_h = 16 \text{ см}^2$



Рис. 3. Образцы кабеля ВВГнг для проведения огневых испытаний с площадью обогрева $S_0 = 1 \text{ см}^2$

Fig. 3. Samples of the PVC insulated & sheathed bare (coverless) cable used in the fire tests with a heating area of $S_h = 1 \text{ см}^2$

Определение величины оптической плотности дыма аналогично стандартному методу основано на законе Бугера – Ламберта – Бера [20] и выполняется по формуле:

$$\mu_m = \frac{1}{L} \ln \frac{I_0}{I_{\min}}, \quad (11)$$

где L — длина пути луча света в задымленной среде, м;

$I_0, I_{\min}$ — соответственно, значения начального и конечного светопропускания, %.

Коэффициент дымообразования определялся по следующему выражению (ГОСТ 12.1.044–89, п. 4.18):

$$D_m = \frac{V}{Lm} \ln \frac{I_0}{I_{\min}}, \quad (12)$$

где V — объем экспозиционной камеры, м^3 ;

m — масса образца, кг.

В качестве образцов для огневых испытаний был выбран кабель ВВГнг. Данный выбор был обоснован тем, что одной из основных пожарных нагрузок на объектах энергетики является кабельная продукция, а в базе данных типовой пожарной нагрузки [8] представлены только шесть видов кабелей. Величины удельных коэффициентов дымообразования этих кабелей варьируются от 407 до $850 \text{ Нп} \cdot \text{м}^2/\text{кг}$, что составляет достаточно большой разброс.

Испытания для определения дымообразующей способности сначала проводились на образцах стандартного размера ($4 \times 4 \text{ см}^2$) вместе с токопроводящей частью, как показано на рис. 2. Однако такое количество горючего материала по отношению к объему экспозиционной камеры оказалось избыточным, так как фотометрическая система должна обеспечивать измерение светового потока в рабочем диапазоне светопропускания от 2 до 90 % (по ГОСТ 12.1.044–89, п. 4.18), но в данных условиях светопропускание достигало 0 % практически сразу после начала огневого испытания.

Поэтому было принято решение уменьшить размер образца (рис. 3) до величины, при которой значение минимального светопропускания попадало в рабочий диапазон (по ГОСТ 12.1.044–89, п. 4.18). Однако данный размер образца (площадь поверхности $S_0 = 1 \text{ см}^2$) привел к тому, что за время достижения светопропусканием 0 % среднеобъемная парциальная плотность кислорода практически не изменялась. Поэтому на данной установке, работающей по условно герметичной схеме, проверить экспериментально зависимость оптической плотности дыма от концентрации кислорода не представляется возможным. Однако при работе установки по проточной схеме [21] в дальнейшем такие эксперименты будут выполнены.

Образцы с уменьшенной площадью обогрева были испытаны при различной плотности падающего теплового потока, а именно при 20, 25, 35, 50 и 65 кВт/м².

Также огневые испытания данного материала проводились на стандартной установке (по ГОСТ 12.1.044–89, п. 4.18) для сравнения коэффициента дымообразования. Размеры образцов для проведения испытаний на обеих установках были идентичны.

Обработка и анализ результатов огневых испытаний

Обработка данных огневых испытаний осуществлялась при помощи программы MS Excel.

Значения удельного коэффициента дымообразования при различном тепловом воздействии, полученные на данной экспериментальной установке, представлены в таблице.

Из таблицы видно, что величина удельного коэффициента дымообразования существенно зависит от плотности падающего на образец теплового потока, т.е. от режима горения в камере сгорания экс-

Значения дымообразующей способности

Smoke generation ability values

Показатель Indicator	Значения Values				
Плотность падающего теплового потока, кВт/м ² Incident heat flux density, kW/m ²	20	25	35	50	65
Коэффициент дымообразования, Нп·м ² /кг Smoke generation coefficient, Np·m ² /kg	412	634	632	628	587

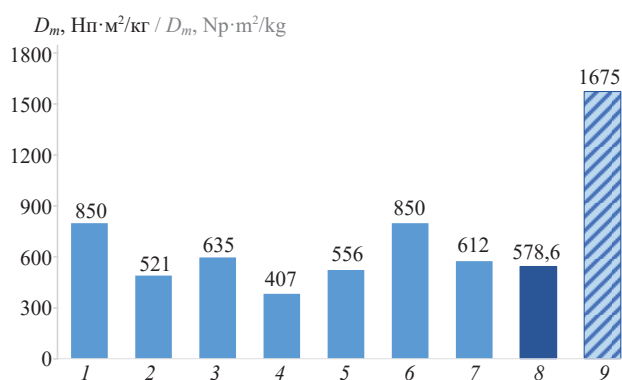


Рис. 4. Гистограмма значений дымообразующей способности из базы данных типовой пожарной нагрузки [4] и усредненных значений, полученных на новой экспериментальной установке [3, 11] и установке по ГОСТ 12.1.044–89 п. 4.18: 1 — резинотехнические изделия (резина и изделия из нее) [4]; 2 — кабельный подвал/лоток кабеля АВВГ + АПВГ [4]; 3 — электрокабель АВВГ ПВХ оболочка + изоляция [4]; 4 — электрокабель АПВГ ПВХ оболочка + полиэтилен [4]; 5 — телефонный кабель ТПВ ПВХ + полиэтилен [4]; 6 — провода в резиновой изоляции типа КПРТ, ПТ, ВПРС [4]; 7 — кабель + провода 0,75(АВВГ, АПВГ, ТПВ) + 0,25 (КПРТ, ПР, ШРПС) [4]; 8 — кабель ВВГнг (экспериментальная установка) [3, 11]; 9 — кабель ВВГнг (стандартная установка ГОСТ 12.1.044–89 п. 4.18)

Fig. 4. A histogram of the smoke generation ability, extracted from the database of standard fire loads [4] and averaged values obtained in the new experimental unit [3, 11] and the unit made according to GOST 12.1.044-89 p. 4.18: 1 — Rubber products: rubber, rubber products [4]; 2 — Cable basement / tray, AVVG + APVG cables [4]; 3 — Electric cable AVVG PVC shell + insulation [4]; 4 — Electric cable APVG PVC shell + polyethylene [4]; 5 — Telephone cable TPV PVC + polyethylene [4]; 6 — Wires having rubber insulation such as KPRT, PT, VPRS [4]; 7 — Cable + wires 0.75 (AVVG, APVG, TPV) + 0.25 (KPRT, PR, SRPS) [4]; 8 — PVC insulated & sheathed bare (coverless) reduced fire hazard rating cable (an experimental unit) [3, 11]; 9 — PVC insulated & sheathed bare (coverless) cable (GOST 12.1.044-89 p. 4.18)

периментальной установки. Поэтому использование вышеуказанной величины при решении уравнений закона сохранения оптической плотности дыма (2) и (7) требует дополнительного обоснования ее выбора при расчете пожара в полномасштабном помещении.

Из таблицы видно, что среднее значение коэффициента дымообразования для кабеля ВВГнг равно 578,6 Нп·м²/кг. Это значение существенно отличается от величины 1675 Нп·м²/кг, полученной на стандартной установке по ГОСТ 12.1.044–89.

Сравнение полученной величины удельного коэффициента дымообразования со значениями в базе данных [8] представлено на рис. 4, из которого видно, что использование стандартной установки по ГОСТ 12.1.044–89 приводит к существенно завышенным значениям вышеуказанного коэффициента.

Экспериментальные зависимости от времени проведения экспериментов удельного коэффициента

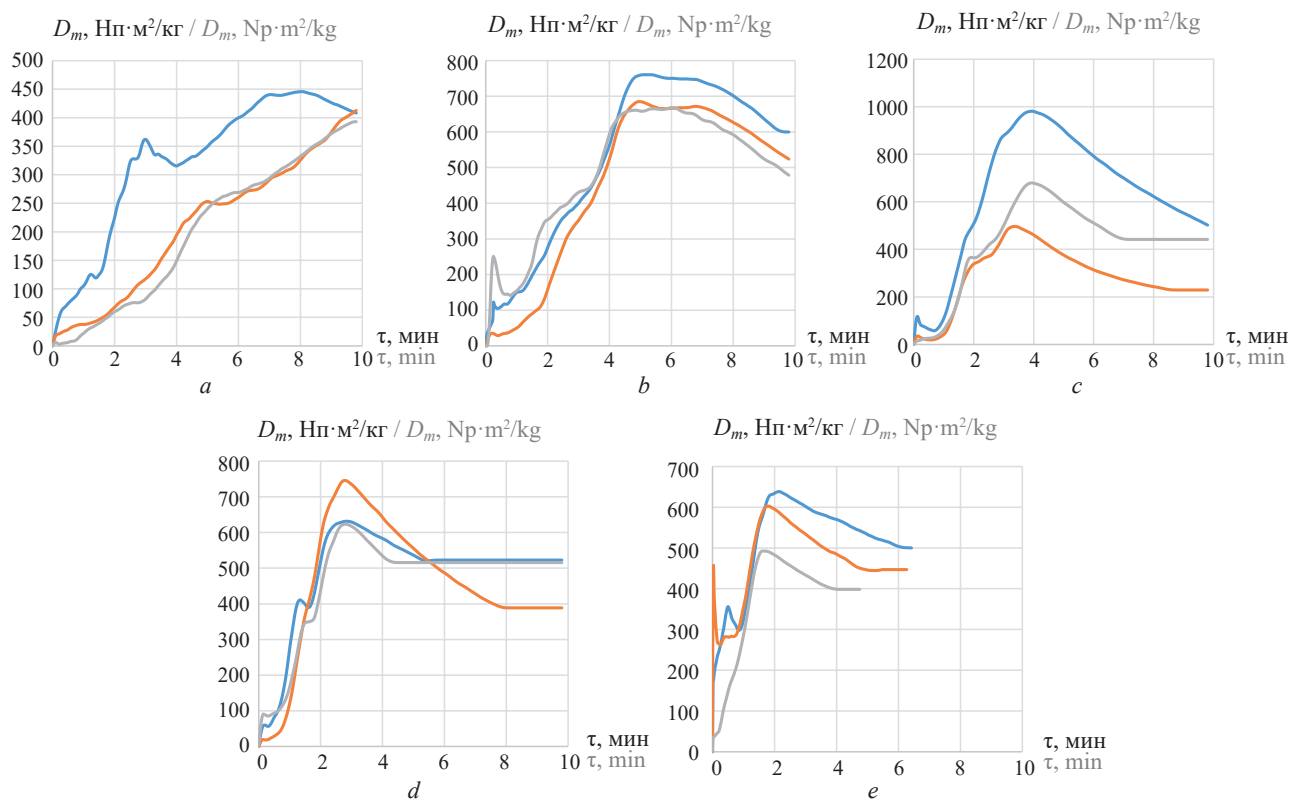


Рис. 5. Зависимости удельного коэффициента дымообразования от времени проведения экспериментов при плотности теплового потока: *a* — 20 кВт/м^2 ; *b* — 25 кВт/м^2 ; *c* — 35 кВт/м^2 ; *d* — 50 кВт/м^2 ; *e* — 65 кВт/м^2

Fig. 5. Dependences between the specific smoke generation coefficient and the time of experiments at the heat flux density: *a* — 20 kW/m^2 , *b* — 25 kW/m^2 , *c* — 35 kW/m^2 ; *d* — 50 kW/m^2 ; *e* — 65 kW/m^2

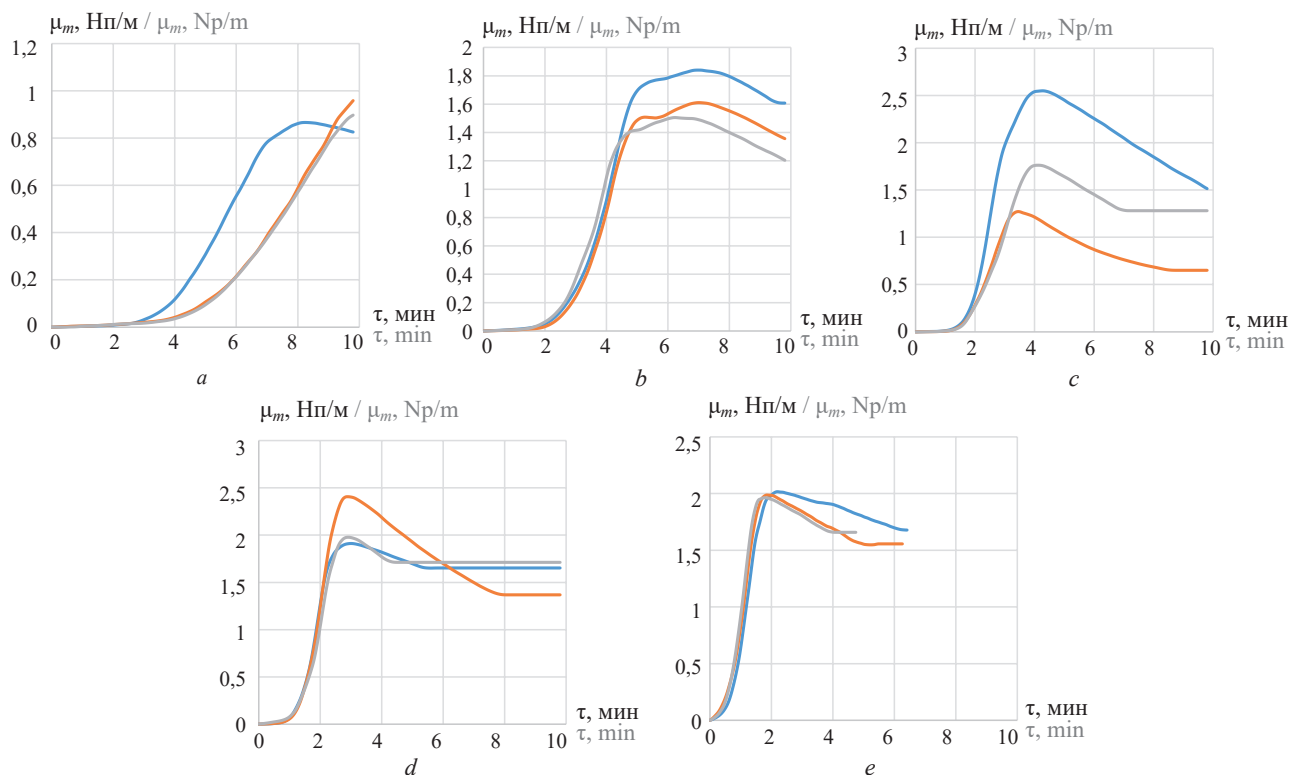


Рис. 6. Зависимости оптической плотности дыма от времени проведения экспериментов при плотности теплового потока: *a* — 20 кВт/м^2 ; *b* — 25 кВт/м^2 ; *c* — 35 кВт/м^2 ; *d* — 50 кВт/м^2 ; *e* — 65 кВт/м^2

Fig. 6. Dependences between the optical density of smoke and the time of experiments at the heat flux density: *a* — 20 kW/m^2 , *b* — 25 kW/m^2 , *c* — 35 kW/m^2 ; *d* — 50 kW/m^2 ; *e* — 65 kW/m^2

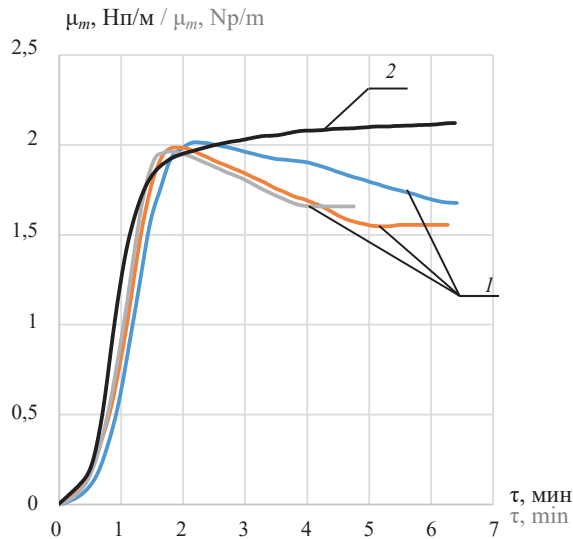


Рис. 7. Зависимости оптической плотности дыма от времени проведения экспериментов при плотности теплового потока 65 кВт/м²: 1 — эксперимент; 2 — расчет (уравнение (2))

Fig. 7. Dependences between the optical density of smoke and the time of experiments at a heat flux density of 65 kW/m²: 1 — experiment; 2 — calculation (equation (2))

дымообразования показаны на рис. 5, от оптической плотности дыма — на рис. 6.

Для оценки адекватности использования уравнения (2) интегральной модели на рис. 7 показаны результаты сопоставления расчетных величин среднеобъемной оптической плотности дыма с их экспериментальными значениями при плотности теплового потока 65 кВт/м². При этом в качестве исходных данных к уравнению (2) использовались экспериментальные значения удельного коэффициента дымообразования и массовой скорости выгорания горючего материала.

Из рис. 7 видно, что совпадение расчета с экспериментом — удовлетворительное для инженерного метода расчета. Существенное расхождение после прохождения 100 с с начала процесса объясняется тем, что в этот момент времени были открытышиберные отверстия в экспозиционной камере для удаления дыма, и процесс горения перестал проходить в герметичном объеме.

Экспериментальные и теоретические (выражение (4)) зависимости среднеобъемной оптической плотности дыма от изменения среднеобъемной тем-

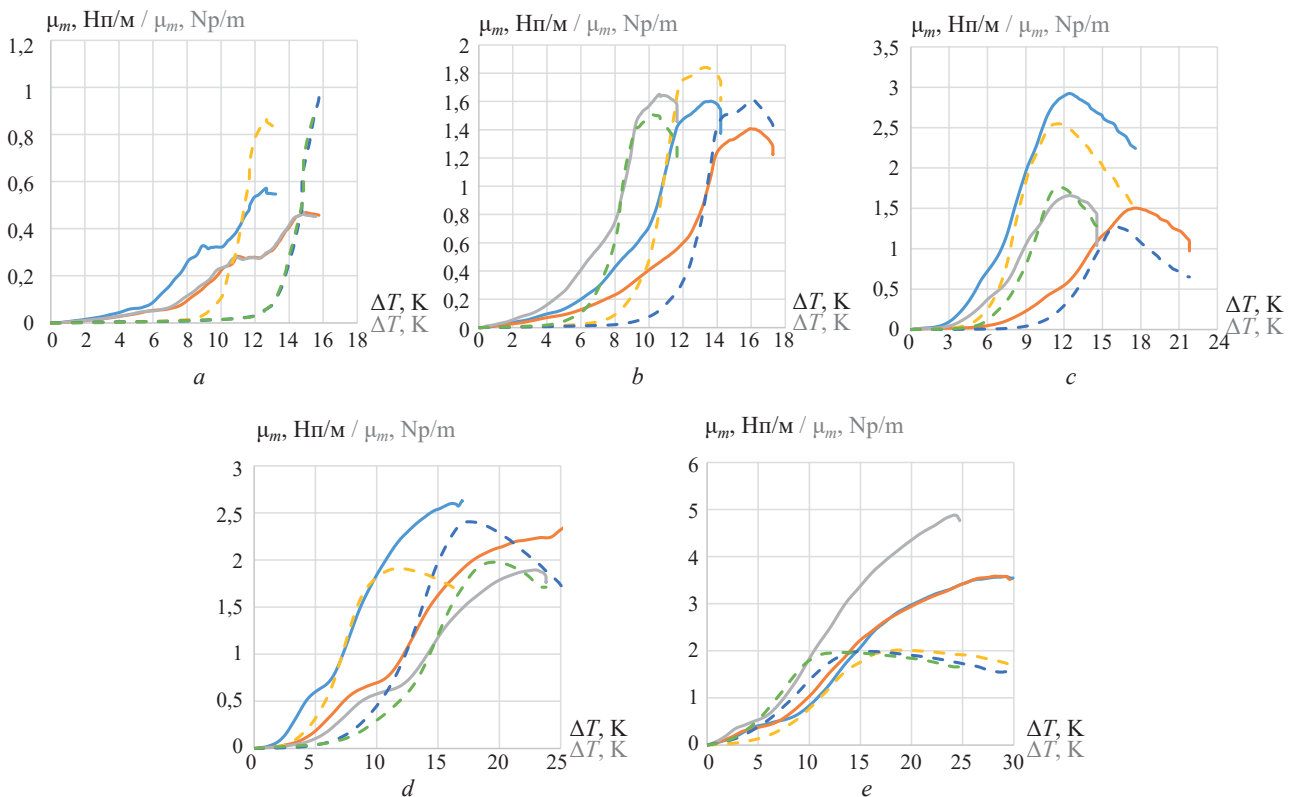


Рис. 8. Зависимости оптической плотности дыма от изменения среднеобъемной температуры при плотности теплового потока: а — 20 кВт/м²; б — 25 кВт/м²; в — 35 кВт/м²; д — 50 кВт/м²; е — 65 кВт/м²; штриховая линия — эксперимент; сплошная линия — расчет с использованием выражения (4)

Fig. 8. Dependences between the optical density of smoke and changes in the volumetric average temperature at the heat flux density: а — 20 kW/m²; б — 25 kW/m²; в — 35 kW/m²; д — 50 kW/m²; е — 65 kW/m²; dashed line — the experiment; solid line — the calculation performed using expression (4)

пературы при различных плотностях теплового потока представлены на рис. 8.

Из рис. 8 видно, что расчетные зависимости среднеобъемной оптической плотности дыма от изменения среднеобъемной температуры качественно соответствуют экспериментальным зависимостям.

Отличия в количественных значениях отражают то, что коэффициент теплопотерь в формуле (4) не измеряется на данной установке, а принят равным его среднему экспериментальному значению для данной установки, полученному в работе [22].

Таким образом, расчет времени блокирования путей эвакуации по потере видимости при пожаре в полномасштабном помещении без использования уравнений закона сохранения оптической плотности дыма (2) и (7) можно проводить следующим образом:

- нахождение зависимостей от времени среднеобъемной температуры или среднеобъемной парциальной плотности кислорода;
- определение величины среднеобъемной оптической плотности дыма по величине среднеобъемной температуры или среднеобъемной

парциальной плотности кислорода в каждый момент времени;

- расчет по существующей методике [8] величины оптической плотности дыма на высоте рабочей зоны путей эвакуации в каждый момент времени, по которой по известной формуле [8] определяется дальность видимости.

Выводы

В предложенном экспериментально-теоретическом подходе к расчету времени блокирования путей эвакуации по потере видимости при пожаре в полномасштабном помещении предлагается использовать экспериментальные зависимости среднеобъемной оптической плотности дыма от изменения среднеобъемной температуры или среднеобъемной парциальной плотности кислорода, полученные в маломасштабной экспериментальной установке.

При этом отпадает необходимость решения дифференциального уравнения закона сохранения оптической плотности дыма, в которое входит удельная дымообразующая способность, существенно зависящая от условий проведения эксперимента.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Александренко М.В., Акулова М.В., Ибрагимов А.М.* Математическое моделирование пожара // Международный научно-исследовательский журнал. 2015. № 4–1 (35). С. 28–29. URL: <https://research-journal.org/technical/matematiceskoe-modelirovanie-pozhara>.
2. *Ярош А.С., Чалаташвили М.Н., Кроль А.Н., Попова Е.А., Романова В.В., Сачков А.В.* Анализ математических моделей развития опасных факторов пожара в системе зданий и сооружений // Вестник научного центра по безопасности работ в угольной промышленности/ Industrial safety. 2019. № 1. С. 50–56.
3. *Dennai B., El M., Khelifaoul R.* Numerical investigation of flow dynamic in mini-channel: case of a mini diode Tesla // Fluid Dynamics & Materials Processing. 2016. Vol. 12 (3). Pp. 102–110. DOI: 10.3970/fdmp.2016.012.102
4. *Du J., Wu X., Li R., Cheng R.* Numerical simulation and optimization of a mid-temperature heat pipe exchanger // Fluid Dynamics & Materials Processing. 2019. Vol. 15 (1). Pp. 77–87. DOI: 10.32604/fdmp.2019.05949
5. *Ihdene M., Malek T.B., Aberkane S., Mouderes M., Spiterri P., Abderrahmane G.* Analytical and numerical study of the evaporation on mixed convection in a vertical rectangular cavity // Fluid Dynamics & Materials Processing. 2017. Vol. 13 (2). Pp. 85–105.
6. *Ja A., Cheddadi A.* Numerical simulation of thermosolutal convective transitions in a very narrow porous annulus under the influence of Lewis Number // Fluid Dynamics & Materials Processing. 2017. Vol. 13 (4). Pp. 235–249. DOI: 10.3970/fdmp.2017.013.235
7. *Triveni M.K., Panua R.* Numerical study of natural convection in a right triangular enclosure with sinusoidal hot wall and different configurations of cold walls // Fluid Dynamics & Materials Processing. 2018. Vol. 14 (1). Pp. 1–21. DOI: 10.3970/fdmp.2018.014.001
8. *Кошмаров Ю.А.* Прогнозирование опасных факторов пожара в помещении : учебное пособие. М. : Академия ГПС МВД России, 2000. 118 с.
9. *Колодяжный С.А., Переславцева И.И.* Математическое моделирование динамики основных опасных факторов в начальной стадии пожара // Известия Казанского государственного

- ного архитектурно-строительного университета. 2014. № 4 (30). С. 403–412. URL: <https://elibrary.ru/item.asp?id=23419307>
10. Husted B.P., Carlsson J., Goransson U. Visibility through inhomogeneous smoke using CFD proceedings of interflam. Edinburgh, 2004. Pp. 697–702.
 11. Драйздейл Д. Введение в динамику пожаров / пер. с англ. М. : Стройиздат, 1990. 424 с.
 12. Мустафин В.М., Пузач С.В. Влияние начальной освещенности и дымообразующей способности на расчетное время блокирования путей эвакуации по потере видимости // Безопасность жизнедеятельности. 2020. № 2. С. 17–22.
 13. Orzel R.A. Toxicological aspects of firesmoke: polymer pyrolysis and combustion // Occupational Medicine. 1993. Vol. 8 (3). Pp. 414–429.
 14. Пузач С.В., Смагин А.В., Лебедченко О.С., Абакумов Е.С. Новые представления о расчете необходимого времени эвакуации людей и об эффективности использования портативных фильтрующих самоспасателей при эвакуации на пожарах. М. : Академия ГПС МЧС России, 2007. 222 с.
 15. Мустафин В.М., Пузач С.В., Акперов Р.Г. Влияние условий проведения испытаний в камере сгорания мелкомасштабной экспериментальной установки на дымообразующую способность древесины // Пожаровзрывобезопасность/Fire and Explosion Safety. 2020. Т. 29. № 1. С. 23–31. DOI: 10.18322/PVB.2020.29.01.23-31
 16. Rasbash D.J., Drysdale D.D. Fundamentals of smoke production // Fire Safety Journal. 1982. Vol. 5. Issue 1. Pp. 77–86.
 17. Барботько С.Л., Вольный О.С. Оценка тепловыделения при горении электрических кабелей // Пожаровзрывобезопасность/Fire and Explosion Safety. 2016. Т. 25. № 11. С. 35–44. DOI: 10.18322/PVB.2016.25.11.35-44
 18. Пузач С.В. Методы расчета тепломассообмена при пожаре в помещении и их применение при решении практических задач пожаровзрывобезопасности. М. : Академия ГПС МЧС России, 2005. 336 с.
 19. Mouritz A.P., Gibson A.G. Fire properties of polymer composite materials. Dordrecht, Netherlands : Springer, 2006. 398 p.
 20. Widmann J.F. Evaluation of the planck mean absorption coefficients for radiation transport through smoke // Combustion Science and Technology. 2003. Vol. 175. Pp. 2299–2308. DOI: 10.1080/714923279
 21. Пузач С.В., Сулейкин Е.В. Новый теоретико-экспериментальный подход к расчету распространения токсичных газов при пожаре в помещении // Пожаровзрывобезопасность/Fire and Explosion Safety. 2016. Т. 25. № 2. С. 13–20. DOI: 10.18322/PVB.2016.25.02.13-20
 22. Пузач С.В., Акперов Р.Г. Экспериментальное определение удельного коэффициента образования монооксида углерода при пожаре в помещении // Пожаровзрывобезопасность/Fire and Explosion Safety. 2016. Т. 25. № 5. С. 18–25. DOI: 10.18322/PVB.2016.25.05.18-25

REFERENCES

1. Aleksandrenko M.V., Akulova M.V., Ibragimov A.M. Mathematical modelling of the fire. *Meždunarodnyj naučno-issledovatel'skij žurnal /International research journal*. 2015; 4-1(35):28-29. URL: <https://research-journal.org/technical/matematiceskoe-modelirovanie-pozhara/> (rus).
2. Yarosh A.S., Chalatahshvili M.N., Krol A.N., Popova E.A., Romanova V.V., Sachkov A.V. The system of buildings and structures dangerous fire factors development mathematical models alysis. *Bulletin of research center for safety in coal industry/Industrial safety*. 2019; 1:50-56. (rus).
3. Dennai B., El M., Khelfaoul R. Numerical investigation of flow dynamic in mini-channel: case of a mini diode Tesla. *Fluid Dynamics & Materials Processing*. 2016; 12(3):102-110. DOI: 10.3970/fdmp.2016.012.102
4. Du J., Wu X., Li R., Cheng R. Numerical simulation and optimization of a mid-temperature heat pipe exchanger. *Fluid Dynamics & Materials Processing*. 2019; 15(1):77-87. DOI: 10.32604/fdmp.2019.05949
5. Ihdene M., Malek T.B., Aberkane S., Mouderes M., Spiterri P., Abderrahmane G. Analytical and numerical study of the evaporation on mixed convection in a vertical rectangular cavity. *Fluid Dynamics & Materials Processing*. 2017; 13(2):85-105. DOI: 10.3970/fdmp.2017.013.235

6. Ja A., Cheddadi A. Numerical simulation of thermosolutal convective transitions in a very narrow porous annulus under the influence of Lewis Number. *Fluid Dynamics & Materials Processing*. 2017; 13(4):235-249. DOI: 10.3970/fdmp.2017.013.235
7. Triveni M.K., Panua R. Numerical study of natural convection in a right triangular enclosure with sinusoidal hot wall and different configurations of cold walls. *Fluid Dynamics & Materials Processing*. 2018; 14(1):1-21. DOI: 10.3970/fdmp.2018.014.001
8. Koshmarov Yu.A. *Forecasting of fire hazards in the case of indoor fire*. Moscow, State Fire Academy of Emercom of Russia Publ., 2000; 118. (rus).
9. Kolodyazhny S.A., Pereslavytseva I.I. Mathematical modeling of the dynamics of the main hazards in the initial stage of fire. *News of the Kazan State University of Architecture and Engineering*. 2014; 4(30):403-412. URL: <https://elibrary.ru/item.asp?id=23419307> (rus).
10. Husted B.P., Carlsson J., Goransson U. *Visibility through Inhomogeneous smoke using CFD Proceedings of Interflam*. Edinburgh, 2004; 697-702.
11. Draydel D.D. *An introduction to fire dynamics*. Chichester, John Wiley and Sons, 1985.
12. Mustafin V.M., Puzach S.V. The effect of primary illumination and smoke-forming ability on the estimated time of blocking escape routes because of poor visibility. *Bezopasnost' zhiznedeyatel'nosti/Life Safety*. 2020; 2:17-22. (rus).
13. Orzel R.A. Toxicological aspects of firesmoke: polymer pyrolysis and combustion. *Occupational Medicine*. 1993; 8(3):414-429.
14. Puzach S.V., Smagin A.V., Lebedchenko O.S., Abakumov E.S. *New ideas about the calculation of necessary time of evacuation of people and the effectiveness of using a portable filter self-rescuers during evacuation at fires*. Moscow, State Fire Academy of Emercom of Russia Publ., 2007; 222. (rus).
15. Mustafin V.M., Puzach S.V., Akperov R.G. Influence of conditions in the combustion chamber of small-scale installation on smoke generating ability of wood. *Pozharovzryvbezopasnost/Fire and Explosion Safety*. 2020; 29(1):23-31. DOI: 10.18322/PVB.2020.29.01.23-31 (rus).
16. Rasbash D.J., Drysdale D.D. Fundamentals of smoke production. *Fire Safety Journal*. 1982; 5(1):77-86.
17. Barbotko S.L., Volnyy O.S. Heat release assessment at burning electric cables. *Pozharovzryvbezopasnost/Fire and Explosion Safety*. 2016; 25(11):35-44. DOI: 10.18322/PVB.2016.25.11.35-44 (rus).
18. Puzach S.V. *Methods for calculating the heat and mass exchange in a fire in the room and their application in solving practical tasks of fire and explosion protection*. Moscow, State Fire Academy of Emercom of Russia Publ., 2005; 336. (rus).
19. Mouritz A.P., Gibson A.G. *Fire properties of polymer composite materials*. Dordrecht, Netherlands, Springer, 2006; 398. (rus).
20. Widmann J.F. Evaluation of the planck mean absorption coefficients for radiation transport through smoke. *Combustion Science and Technology*. 2003; 175:2299-2308. DOI: 10.1080/714923279 (rus).
21. Puzach S.V., Suleykin E.V. New united theoretical and experimental approach to the calculation of the distribution of toxic gases in case of fire in the room. *Pozharovzryvbezopasnost/Fire and Explosion Safety*. 2016; 25(2):13-20. DOI: 10.18322/PVB.2016.25.02.13-20 (rus).
22. Puzach S.V., Akperov R.G. Experimental determination of the specific coefficient of release of carbon monoxide during a fire in the room. *Pozharovzryvbezopasnost/Fire and Explosion Safety*. 2016; 25(5):18-25. DOI: 10.18322/PVB.2016.25.05.18-25 (rus).

*Поступила 30.01.2021, после доработки 15.02.2021;
принята к публикации 02.03.2021*

*Received January 30, 2021; Received in revised form February 15, 2021;
Accepted March 2, 2021*

Информация об авторах

ПУЗАЧ Сергей Викторович, д-р техн. наук, профессор, заслуженный деятель науки РФ, начальник кафедры инженерной теплофизики и гидравлики, Академия Государственной противопожарной службы Министерства Российской Федерации по делам гражданской обороны, чрезвычайным ситуациям и ликвидации последствий стихийных бедствий,

Information about the authors

Sergey V. PUZACH, Dr. Sci. (Eng.), Professor, Honoured Scientist of the Russian Federation, Head of Thermal Physics and Hydraulic Department, The State Fire Academy of the Ministry of Russian Federation for Civil Defense, Emergencies and Elimination on Consequences of Natural Disasters, Moscow, Russian Federation; ID RISC: 18265; Scopus Author ID: 7003537835; Re-

г. Москва, Российская Федерация; РИНЦ ID: 18265; Scopus Author ID: 7003537835; ResearcherID: U-2907-2019; ORCID: 0000-0001-7234-1339; e-mail: pzachsv@mail.ru

МУСТАФИН Валихан Мухтарович, адъюнкт, Академия Государственной противопожарной службы Министерства Российской Федерации по делам гражданской обороны, чрезвычайным ситуациям и ликвидации последствий стихийных бедствий, г. Москва, Российская Федерация; преподаватель кафедры оперативно-тактических дисциплин, Академия гражданской защиты им. М. Габдуллина МЧС Республики Казахстан, г. Кокшетау, Республика Казахстан; ORCID: 0000-0001-8391-7241; e-mail: GeneralPK@bk.ru

АКПЕРОВ Руслан Гянджавиевич, канд. техн. наук, старший преподаватель кафедры пожарной безопасности в строительстве, Академия Государственной противопожарной службы Министерства Российской Федерации по делам гражданской обороны, чрезвычайным ситуациям и ликвидации последствий стихийных бедствий, г. Москва, Российская Федерация; РИНЦ ID: 766879; ORCID: 0000-0002-2524-8710; e-mail: akperov01@mail.ru

searcherID: U-2907-2019; ORCID: 0000-0001-7234-1339; e-mail: puzachsv@mail.ru

Valikhan M. MUSTAFIN, Postgraduate Student, The State Fire Academy of the Ministry of Russian Federation for Civil Defense, Emergencies and Elimination on Consequences of Natural Disasters, Moscow, Russian Federation; Lecturer of Operational and Tactical Disciplines Department, Academy of Civil Protection. M. Gabdullina Ministry of Emergency Situations of the Republic of Kazakhstan, Kokshetau, Republic of Kazakhstan; ORCID: 0000-0001-8391-7241; e-mail: GeneralPK@bk.ru

Ruslan G. AKPEROV, Cand. Sci. (Eng.), Senior Lecturer of Fire Safety in Building Department, The State Fire Academy of the Ministry of Russian Federation for Civil Defense, Emergencies and Elimination on Consequences of Natural Disasters, Moscow, Russian Federation; ID RISC: 766879; ORCID: 0000-0002-2524-8710; e-mail: akperov01@mail.ru

О расчетной оценке эффективности тушения пожара класса В спринклерными автоматическими установками

© Л.Т. Танклевский^{1,2}, А.А. Таранцев^{2,3✉}, И.А. Бабилов¹, Д.В. Поляков⁴

¹ Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого (Россия, 195251, г. Санкт-Петербург, ул. Политехническая, 29)

² Санкт-Петербургский университет Государственной противопожарной службы Министерства Российской Федерации по делам гражданской обороны, чрезвычайным ситуациям и ликвидации последствий стихийных бедствий (Россия, 196105, г. Санкт-Петербург, Московский пр-т, 149)

³ Институт проблем транспорта им. Н.С. Соломенко Российской академии наук (Россия, 199178, г. Санкт-Петербург, 12-я Линия ВО, 13)

⁴ Академия Государственной противопожарной службы Министерства Российской Федерации по делам гражданской обороны, чрезвычайным ситуациям и ликвидации последствий стихийных бедствий (Россия, 129366, г. Москва, ул. Бориса Галушкина, 4)

АННОТАЦИЯ

Введение. Проблема своевременной активации спринклерной установки пожаротушения является весьма актуальной для эффективного тушения пожара до наступления критического момента, при котором тушение в расчетных объемах станет невозможным. Решению проблемы эффективного применения спринклерной установки при пожаре класса А посвящен ряд работ. Вопрос применения таких методик при пожаре класса В ранее рассмотрен не был.

Модель пожара в помещении с автоматической установкой пожаротушения (АУП). Разработанная авторами модель оценки времени срабатывания спринклерной автоматической установки водяного пожаротушения при пожаре класса В дает возможность определить скорость распространения пламени по поверхности розлива легковоспламеняющихся и горючих жидкостей (ЛВЖ и ГЖ) и определить скорость нарастания температуры в припотолочной области.

Активация спринклера от теплового разрушения колбы восходящим конвективным потоком. Разработана модель определения времени срабатывания спринклерной установки пожаротушения от воздействия теплового потока пожара класса В на термочувствительную колбу оросителя.

Активация спринклерной АУП от дифференциального теплового пожарного извещателя (ДТПИ). Разработана модель определения времени срабатывания ДТПИ.

Примеры. Дан ряд примеров по практическому определению времени срабатывания спринклерных установок пожаротушения традиционного типа, дренчерных или с принудительным пуском.

Выводы. На основе полученного выражения можно оперативно, с приемлемой достоверностью определять возможность применения той или иной установки спринклерного пожаротушения для обеспечения эффективной защиты помещений, в которых возможно возникновение пожаров класса В.

Ключевые слова: спринклерный ороситель; активация; дифференциальный тепловой пожарный извещатель; критическая высота; розлив ЛВЖ

Для цитирования: Танклевский Л.Т., Таранцев А.А., Бабилов И.А., Поляков Д.В. О расчетной оценке эффективности тушения пожара класса В спринклерными автоматическими установками // Пожаровзрывобезопасность/Fire and Explosion Safety. 2021. Т. 30. № 3. С. 88–98. DOI: 10.22227/0869-7493.2021.30.03.88-98

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

Calculated assessment of effectiveness of class B fire suppression using automatic fire sprinkler systems

© Leonid T. Tanklevskiy^{1,2}, Alexander A. Tarantsev^{2,3✉}, Igor A. Babikov¹, Dmitriy V. Polyakov⁴

¹ Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University (Polytechnicheskaya St., 29, Saint Petersburg, 195251, Russian Federation)

² Saint-Petersburg University of State Fire Service of the Ministry of the Russian Federation for Civil Defense, Emergencies and Elimination on Consequences of Natural Disasters (Moskovskiy Avenue, 149, Saint Petersburg, 196105, Russian Federation)

³ Solomenko Institute of Transport Problems of the Russian academy of sciences (12-ya Liniya VO, 13, Saint Petersburg, 199178, Russian Federation)

⁴ The State Fire Academy of the Ministry of Russian Federation for Civil Defense, Emergencies and Elimination on Consequences of Natural Disasters (Borisa Galushkina St., 4, Moscow, 129366, Russian Federation)

ABSTRACT

Introduction. The problem of timely activation of fire sprinkler systems is highly relevant for effective fire suppression before the critical moment, when calculated values applied to extinguish the fire, become ineffective. A number of works address the problem of effective application of the fire sprinkler system to Class A fires. The application of such methods to Class B fires has not yet been considered.

The model simulating a fire in a room with an automatic fire extinguishing system. The response time assessment model, developed by the co-authors for an automatic water-consuming fire sprinkler system, allows to identify the velocity of flame spreading over the surface of an HFL/CL spillage and the temperature rise rate in the ceiling area in the case of a B class fire.

A sprinkler is triggered by the bulb bursting caused by the thermal effect produced by the ascending convection flow. A model has been developed to determine the response time of a fire sprinkler system exposed to the effect of a heat flow, caused by the Class B fire, on a heat-sensitive sprinkler bulb.

Activation of a fire sprinkler system by the rate-of-rise heat detector. A model, designated for determining the activation time of a rate-of-rise heat detector, was developed.

Examples. A number of examples, illustrating the response time of traditional, deluge, and forced launch fire sprinkler systems, are provided in the article.

Conclusions. The obtained formula allows to quickly check the applicability of different types of fire sprinkler systems to ensure the effective protection of premises in which class B fires may break out.

Keywords: sprinkler; activation; rate-of-rise heat detector; critical height; HIL spillage

For citation: Tanklevskiy L.T., Tarantsev A.A., Babikov I.A., Polyakov D.V. Calculated assessment of effectiveness of class B fire suppression using automatic fire sprinkler systems. *Pozharovzryvobezopasnost/Fire and Explosion Safety*. 2021; 30(3):88-98. DOI: 10.22227/0869-7493.2021.30.03.88-98 (rus).

✉ Alexander Alexeevich Tarantsev, e-mail: info@ipttran.ru

Введение

Спринклерные автоматические установки пожаротушения (АУП) нашли широкое применение в зданиях и помещениях различных групп¹ и классов функциональной пожарной опасности². Активация спринклерных АУП возможна путем вскрытия колб оросителей как от естественного нагрева восходящими высокотемпературными продуктами горения, так и принудительно — от дифференциальных тепловых пожарных извещателей (ДТПИ).

Процессам развития пожаров по пожарной нагрузке [1] в помещениях посвящено много работ отечественных и зарубежных исследователей [2–13]. Также имеется большое количество публикаций в области АУП, касающихся особенностей их действия [14–37] и эффективности применения [38–42].

В частности, в работе [38] были рассмотрены особенности расчетной оценки эффективности применения спринклерных АУП при тушении пожара класса А в зависимости от высоты установки спринклеров в защищаемом помещении и вида пожарной нагрузки с учетом места возникновения очага пожара и вероятности отказа ближайшего к нему оросителя. Эти расчеты были положены в основу приложения В Методики оценки возмож-

ности использования спринклерной АУП к СП 485.1311500.2020³.

Тем не менее представляется целесообразным рассмотреть особенность срабатывания спринклерной АУП при пожаре класса В с активацией от вскрытия колбы оросителя как от естественного нагрева, так и принудительно — от ДТПИ. При этом следует учитывать, что горение проливов легковоспламеняющихся и горючих жидкостей (ЛВЖ и ГЖ) в виде достаточно тонкого слоя может быть потушено водой.

1. Модель пожара в помещении с АУП

Применительно к задаче оценки эффективности тушения очага пожара класса В спринклерной системой АУП целесообразно использовать модель [2–4, 38], согласно которой для припотолочной области помещения, где расположены спринклеры, имеют место следующие выражения для скорости u_T и температуры T_T восходящих продуктов горения (рис. 1):

$$u_T = 0,96 \left(\frac{Q}{H} \right)^{1/3} \min \left(1; 0,203 \left(\frac{H}{r} \right)^{5/6} \right); \quad (1)$$

$$T_T = T_0 + 16,9 \frac{Q^{2/3}}{H^{5/3}} \min \left(1; 0,318 \left(\frac{H}{r} \right)^{2/3} \right); \quad (2)$$

¹ СП 5.13130.2009 Системы противопожарной защиты. Установки пожарной сигнализации и пожаротушения автоматические. Нормы и правила проектирования (с Изменением № 1) : (СП 5.13130.2009) : утвержден и введен в действие Приказом МЧС России от 25 марта 2009 г. № 175.

² Федеральный закон «Технический регламент о требованиях пожарной безопасности» № 123-ФЗ от 22 июля 2008 г. : принят Государственной Думой 4 июля 2008 г.; утвержден Советом Федерации 11 июля 2008 г.

³ Системы противопожарной защиты. Установки пожаротушения автоматические. Нормы и правила проектирования : (СП 485.1311500.2020) : утвержден и введен в действие приказом Министерства Российской Федерации по делам гражданской обороны, чрезвычайным ситуациям и ликвидации последствий стихийных бедствий от 31 августа 2020 г. № 628.

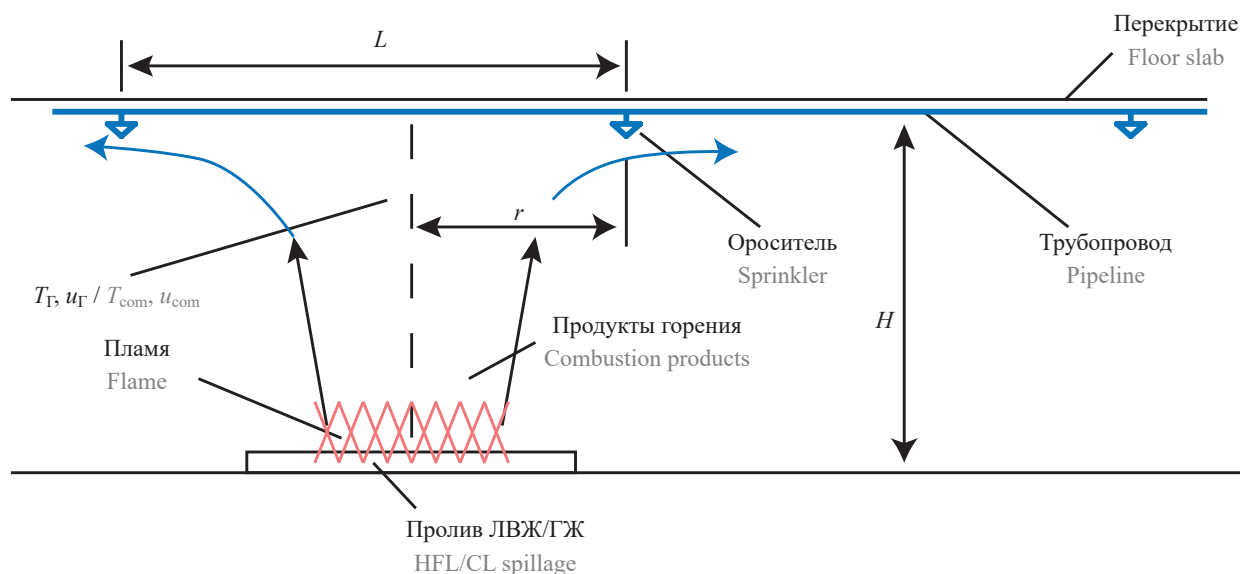


Рис. 1. Расчетная схема

Fig. 1. Design model

где H — высота расположения sprinkлеров над пожарной нагрузкой, может приниматься равной высоте помещения, м;

r — расстояние от оси конвективной колонки до ближайшего оросителя, м;

T_0 — начальная температура в помещении;

Q — тепловая мощность очага пожара, кВт.

Эмпирические выражения (1) и (2) предполагают, что перекрытие защищаемого помещения горизонтальное, влияние бокового воздушного потока на конвективную колонку незначительно, продукты горения свободно распространяются под перекрытием в горизонтальных направлениях и не накапливаются в припотолочном слое.

Величина Q , в свою очередь, является произведением удельной мощности тепловыделения q на площадь пожара $S_{\text{п}}$:

$$Q = S_{\text{п}} q. \quad (3)$$

Величина $S_{\text{п}}$ зависит от рельефа пола помещения и находящихся на нем предметов. Однако при допущении, что пол горизонтальный и не загроможден, а помещение достаточно просторное, величину $S_{\text{п}}$ можно оценить из выражения:

$$S_{\text{п}} \approx V/h_{\text{пл}}, \quad (4)$$

где V — объем пролитой жидкости;

$h_{\text{пл}}$ — толщина пленки жидкости (согласно [43], 1...2 мм).

Применительно к проливам ЛВЖ и ГЖ скорость распространения пламени по зеркалу пролитой жидкости $u_{\text{п}}$ значительно выше, чем по поверхности твердых горючих материалов. В этой связи можно полагать, что тепловая мощность пожара почти скачкообразно достигает величины Q в те-

чение времени $t_{\text{п}}$, а потом остается постоянной. Из условия, что площадь пожара $S_{\text{п}}$ соответствует площади пролива ЛВЖ/ГЖ, величину $t_{\text{п}}$ можно оценить из выражения:

$$t_{\text{п}} = \frac{L}{u_{\text{п}}}, \quad (5)$$

где L — расстояние от источника зажигания до наиболее удаленной части площади пролива ЛВЖ/ГЖ;

$u_{\text{п}}$ — скорость распространения пламени по зеркалу пролива.

Динамику площади пожара $S_{\text{п}}(t)$, если пролив ЛВЖ/ГЖ имеет форму круга с радиусом $R_{\text{ж}}$, целесообразно оценить для двух крайних случаев: когда очаг пожара в центре пролива и когда он на его границе. В первом случае

$$S_{\text{п}} = \pi(u_{\text{п}}t)^2, \quad t \in \left[0; \frac{R_{\text{ж}}}{u_{\text{п}}}\right], \quad L = R_{\text{ж}}. \quad (6)$$

Во втором случае (очаг пожара на границе кругового пролива) площадь пожара $S_{\text{п}}$ представляет собой площадь взаимопересечения окружностей радиусов $R_{\text{ж}}$ и $R_{\text{п}} = u_{\text{п}}t$, то исходя из геометрических соображений:

$$S_{\text{п}} = S_1 + S_2, \quad L = 2R_{\text{ж}}, \quad (7)$$

$$\text{где } S_1 = R_{\text{ж}}^2 \left[\arccos \left(1 - \frac{R_{\text{п}}^2}{2R_{\text{ж}}^2} \right) - \frac{R_{\text{п}}}{R_{\text{ж}}} \left(1 - \frac{R_{\text{п}}^2}{2R_{\text{ж}}^2} \right) \times \sqrt{1 - \frac{R_{\text{п}}^2}{4R_{\text{ж}}^2}} \right], \quad S_2 = \frac{R_{\text{п}}^2}{2} \left[\arccos \frac{R_{\text{п}}}{R_{\text{ж}}} - \frac{R_{\text{п}}}{R_{\text{ж}}} \sqrt{1 - \frac{R_{\text{п}}^2}{4R_{\text{ж}}^2}} \right].$$

Диапазон динамики площади пожара при круговом проливе ЛВЖ/ГЖ приведен на рис. 2 для случая $R_{\text{ж}} = 2,185$ м.

Если пролив ЛВЖ/ГЖ имеет форму прямоугольника со сторонами a и b ($a < b$), также целесообразно оценить динамику площади пожара $S_{\Pi}(t)$ для двух крайних случаев: когда очаг пожара находится

в центре прямоугольника и в углу. Когда очаг пожара в центре прямоугольника, исходя из геометрических соображений [5] (здесь $R_{\Pi} = u_{\Pi}t$ — текущее расстояние, пройденное фронтом пламени):

$$S_{\Pi} = \begin{cases} \pi R_{\Pi}^2 & \text{при } R_{\Pi} \in \left(0; \frac{a}{2}\right); \\ R_{\Pi}^2 \left(\pi - 2 \arccos \frac{a}{2R_{\Pi}} \right) + a \sqrt{R_{\Pi}^2 - 0,25a^2} & \text{при } R_{\Pi} \in [0,5a; 0,5b); \\ R_{\Pi}^2 \left(\pi - 2 \arccos \frac{a}{2R_{\Pi}} - 2 \arccos \frac{b}{2R_{\Pi}} \right) + a \sqrt{R_{\Pi}^2 - \frac{a^2}{4}} + b \sqrt{R_{\Pi}^2 - \frac{b^2}{4}} & \text{при } 2R_{\Pi} \in \left[b; \sqrt{a^2 + b^2}\right]; \end{cases} \quad (8)$$

Из (8) следует, что $S_{\Pi} = ab$ при $R_{\Pi} = L = 0,5\sqrt{a^2 + b^2}$.

Когда очаг пожара в углу прямоугольного пролива:

$$S_{\Pi} = \begin{cases} \frac{\pi}{4} R_{\Pi}^2 & \text{при } R_{\Pi} \in (0; a); \\ \frac{R_{\Pi}^2}{2} \left(\frac{\pi}{2} - \arccos \frac{a}{R_{\Pi}} \right) + \frac{a}{2} \sqrt{R_{\Pi}^2 - a^2} & \text{при } R_{\Pi} \in [a; b); \\ \frac{R_{\Pi}^2}{2} \left(\frac{\pi}{2} - \arccos \frac{a}{R_{\Pi}} - \arccos \frac{b}{R_{\Pi}} \right) + \frac{a}{2} \sqrt{R_{\Pi}^2 - a^2} + \frac{b}{2} \sqrt{R_{\Pi}^2 - b^2} & \text{при } R_{\Pi} \in \left[b; \sqrt{a^2 + b^2}\right]; \end{cases} \quad (9)$$

Из (9) следует, что $S_{\Pi} = ab$ при $R_{\Pi} = L = \sqrt{a^2 + b^2}$. Диапазон динамики площади пожара при прямоугольном проливе ЛВЖ/ГЖ приведен на рис. 3 для случая $a = 3$ м, $b = 5$ м.

При других формах площади пролива и местах очагов возгорания динамика $S_{\Pi}(t)$ и расстояния L также может быть определена с использованием геометрических соотношений и численных методов [44], но это выходит за рамки данной статьи.

Учитывая также, что вертикальная проекция оси извещателя попадает на площадь пожара и $r < 0,148H$ (см. рис. 1), выражения (1) и (2) могут быть представлены в упрощенном виде:

$$u_{\Gamma} = 0,96 \left(\frac{Q}{H} \right)^{1/3}; \quad (10)$$

$$T_{\Gamma} = T_0 + 16,9 \frac{Q^{2/3}}{H^{5/3}}. \quad (11)$$

2. Активация спринклера от теплового разрушения колбы восходящим конвективным потоком

Если активация спринклера происходит при разрушении его колбы от естественного нагрева восходящим конвективным потоком продуктов горения до паспортной температуры срабатывания T_a , то условие активации спринклерной АУП обуславливается неравенством:

$$T \geq T_a, \quad (12)$$

где T — текущая температура колбы.

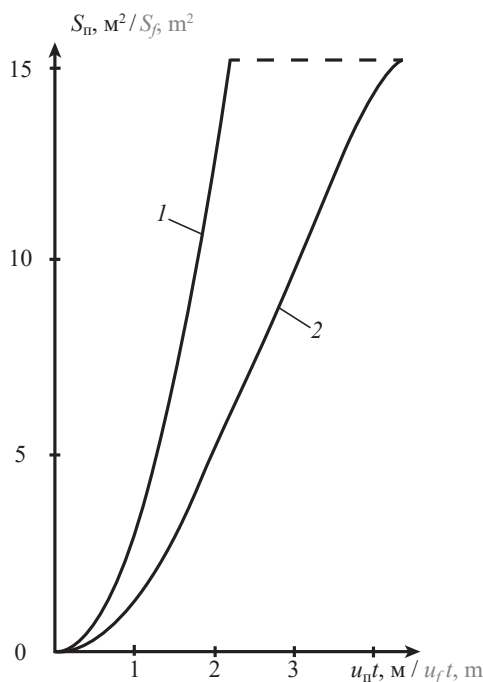


Рис. 2. Диапазон динамики площади пожара при проливе ЛВЖ/ГЖ в форме круга диаметром 4,37 м: 1 — очаг в центре пролива; 2 — очаг у края пролива

Fig. 2. The range of dynamic patterns of fire areas in the case of a circular HIL spillage with a 4.37 m diameter: 1 — the fire seat is in the centre; 2 — the fire seat is at the edge of the spillage

Согласно [14, 15], температура колбы спринклера T , определяющая его срабатывание, может быть описана уравнением теплового баланса:

$$K \frac{dT}{dt} = -\sqrt{u_r} (T - T_r) - C(T - T_r), \quad (13)$$

где C — коэффициент теплоотдачи от колбы к корпусу оросителя (коэффициент потерь тепла), $(\text{м/с})^{1/2}$;

T_r — температура корпуса оросителя, $^{\circ}\text{C}$;

K — коэффициент тепловой инерционности колбы, $(\text{с} \cdot \text{м})^{0.5}$.

Полагая, что температура корпуса T_c оросителя незначительно отличается от температуры колбы T и $(u_r, T_r) \approx \text{const}$, можно пренебречь вторым слагаемым в обыкновенном дифференциальном уравнении 1-го порядка (2.2) и с учетом [45] при начальном

условии $T(t=0) = T_0$ получить его решение в явном виде:

$$t_a = \frac{K}{\sqrt{u_r}} \ln \frac{T_r - T_0}{T_r - T_a}, \quad (14)$$

где t_a — время нагрева колбы спринклера, когда ее температура T достигнет паспортной величины T_a .

В таблице приведены значения условного времени $t_a K^{-1}$ в зависимости от высоты помещения H и тепловой мощности очага пожара Q , принимая во внимание (10) и (11).

С учетом (11) выражение (14) справедливо при условии:

$$Q > 0,0144 H^{2.5} (T_a - T_0)^{1.5}. \quad (15)$$

Таким образом, общее время активации АУП от теплового разрушения колбы можно оценить из выражения:

$$t_k = t_n + t_a, \quad (16)$$

Условное время срабатывания спринклера $t_a K^{-1} (\text{с/м})^{0.5}$ в зависимости от высоты помещения H и тепловой мощности очага пожара Q

Conditioned sprinkler response time $t_a K^{-1} (\text{с/м})^{0.5}$ depending on floor-to-ceiling height H and thermal capacity of fire seat Q

$H, \text{ м / m}$	$Q, \text{ кВт / kW}$						
	1000	2000	3000	5000	10 000	20 000	30 000
20	—	—	—	—	0,5043	0,2070	0,1352
19	—	—	—	—	0,4205	0,1825	0,1205
18	—	—	—	—	0,3543	0,1605	0,1070
17	—	—	—	0,9521	0,3002	0,1407	0,0946
16	—	—	—	0,6770	0,2548	0,1228	0,0832
15	—	—	—	0,5199	0,2161	0,1067	0,0728
14	—	—	1,0827	0,4114	0,1828	0,0921	0,0632
13	—	—	0,7017	0,3299	0,1539	0,0789	0,0544
12	—	1,2085	0,5114	0,2657	0,1287	0,0669	0,0464
11	—	0,7149	0,3868	0,2137	0,1066	0,0561	0,0391
10	—	0,4971	0,2963	0,1707	0,0872	0,0464	0,0325
9	1,1855	0,3604	0,2269	0,1348	0,0702	0,0378	0,0265
8	0,6465	0,2637	0,1721	0,1046	0,0554	0,0301	0,0212
7	0,4161	0,1913	0,1281	0,0793	0,0426	0,0233	0,0164
6	0,2753	0,1357	0,0925	0,0582	0,0316	0,0174	0,0123
5	0,1792	0,0925	0,0639	0,0407	0,0223	0,0123	0,0087

где время t_n определяется по выражению (5), а время t_a — по (14).

Следует иметь в виду, что при большой площади горения S_n пролива ЛВЖ/ГЖ, превышающей площадь, защищаемую одним оросителем, могут активироваться сразу несколько оросителей, что позволит гарантированно потушить пожар. В то же время, если площадь пролива будет иметь сложную конфигурацию, для оценки эффективности срабатывания АУП целесообразно провести либо компьютерный эксперимент (например, с использованием полевой модели пожара [6, 46]), либо натурный.

3. Активация спринклерной АУП от ДТПИ

Поскольку после момента t_n , когда пожар охватит всю площадь пролива, и температура T_r , согласно (2), стабилизировалась, важным условием срабатывания ДТПИ будет неравенство:

$$t_n > t_{ДТПИ}, \quad (17)$$

где $t_{ДТПИ}$ — время, в течение которого скорость возрастания температуры T_r достигнет паспортного значения θ_n срабатывания ДТПИ.

При $t < t_n$ будет иметь место скорость роста температуры T_r , которая может быть определена дифференцированием выражения (11) с учетом (3):

$$\frac{dT_r}{dt} = \frac{k_0 q^{2/3}}{H^{5/3} S_n^{1/3}} \frac{dS_n}{dt}, \quad (18)$$

где $k_0 = 11,2667$.

Зная вид динамики площади пожара $S_n(t)$, из (18) может быть найдено время $t_{ДТПИ}$. Некоторая трудность может заключаться только в нахождении производной dS_n/dt .

Применительно к круговому проливу, когда $S_n = \pi(u_n t)^2$ (например, линия 1 на рис. 2), очаг в центре и $r < 0,148H$, выражение (18) принимает вид:

$$\frac{dT_r}{dt} = 48,335 \frac{(u_n^2 q)^{2/3}}{H^{5/3}} t^{1/3}. \quad (19)$$

Предположив, что скорость роста температуры dT_r/dt достигла паспортного значения θ_n срабатывания ДТПИ, из (19) можно определить время $t_{ДТПИ}$:

$$t_{ДТПИ} = 4,28 \cdot 10^{-4} \frac{H^5 \theta_n^3}{u_n^4 q^2}. \quad (20)$$

При других формах площади пролива и очагах начала возгорания сложность нахождения $t_{ДТПИ}$ увеличивается. Например, найти производную dS_n/dt в выражениях (7)–(9) уже намного сложнее, поэтому для нахождения $t_{ДТПИ}$ потребуется применение численных методов.

Учитывая инерционность, обусловливаемую временем t_n , общее время принудительного разрушения колбы и активации тем самым оросителя может быть найдено из выражения:

$$t_k = t_{ДТПИ} + t_a. \quad (21)$$

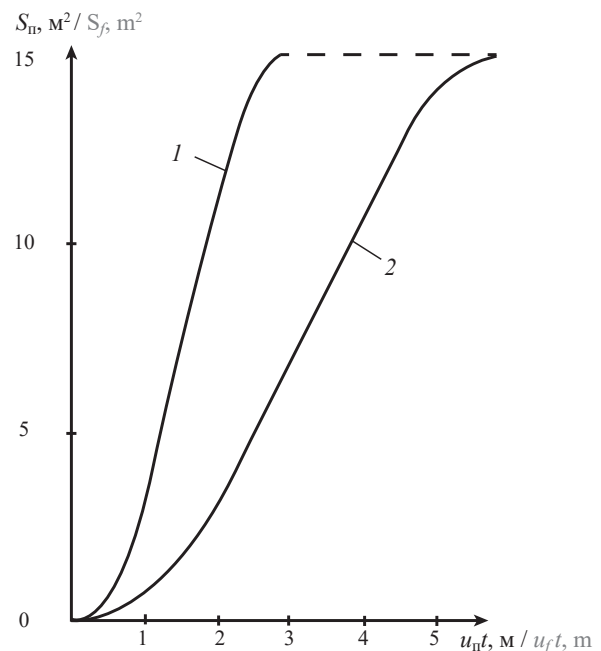
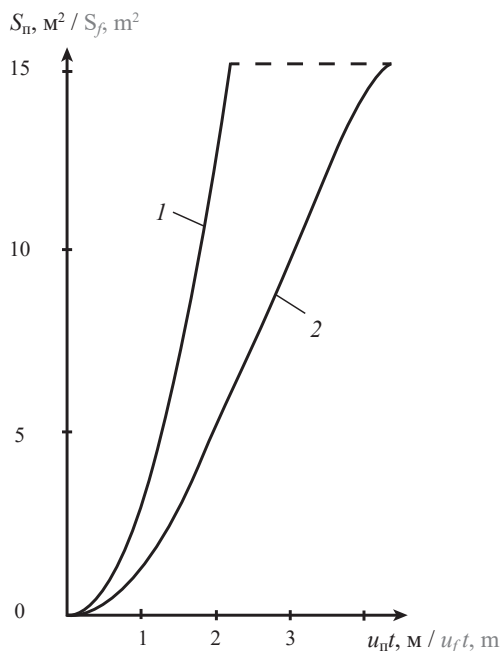


Рис. 3. Диапазон динамики площади пожара, когда пролив ЛВЖ/ГЖ имеет прямоугольную форму 3×5 м: 1 — очаг в центре пролива; 2 — очаг в углу пролива

Fig. 3. The range of dynamic patterns of fire areas in the case of a rectangular HIL spillage, having the dimensions of 3×5 m: 1 — the fire seat is in the centre; 2 — the fire seat is at the edge of the spillage

4. Примеры

4.0. В помещении высотой $H = 10$ м произошел пролив ЛВЖ ($q \approx 2000$ кВт/м², $u_{\text{п}} \approx 1$ м/с) на площади $S_{\text{п}} = 15$ м² в форме круга. В соответствии с (3) тепловая мощность пожара: $Q = 15 \cdot 2000 = 30\,000$ кВт. Учитывая, что источник зажигания находился в центре пролива, максимальное расстояние, пройденное пламенем по проливу ЛВЖ: $L = R_{\text{ж}} = \sqrt{S_{\text{п}}/\pi} = \sqrt{15/\pi} = 2,185$ м. По выражению (5) получаем время воспламенения всего пролива ЛВЖ: $t_{\text{п}} = 2,185/1 = 2,185$ с.

Требуется оценить время срабатывания спринклерной АУП при различных способах активации с учетом того, что $T_0 = 20$ °С, а центр пролива находится на расстоянии 1 м от вертикальной оси оросителя.

4.1. Спринклерная АУП в данном помещении активируется от термического разрушения колбы восходящими потоками продуктов горения при $T_a = 60$ °С, имеющей коэффициент тепловой инерционности $K = 120$ (с·м)^{0,5}.

Поскольку условие (4) выполняется: $30\,000 > 0,0144 \cdot 10^{2,5}(60 - 20)^{1,5} = 1152$ кВт, спринклерная АУП может активироваться от теплового разрушения колбы восходящими продуктами горения.

По выражениям (10) и (11) оценим скорость и температуру продуктов горения в припотолочном слое:

$$u_{\text{Г}} = 0,96 (30\,000/10)^{1/3} = 0,96 \cdot 14,42 = 13,85 \text{ м/с};$$

$$T_{\text{Г}} = 20 + 16,9 \cdot 30\,000^{2/3}/10^{5/3} = 371,5 \text{ °С}.$$

По выражению (14) получаем: $t_a = 120/\sqrt{13,85} \times \ln(371,5 - 20/371,5 - 60) = 3,895$ с. По выражению

(16) находим общее время активации АУП от теплового разрушения колбы: $t_k = 2,185 + 3,895 = 6,080$ с.

Таким образом, при пожаре пролива ЛВЖ в данном помещении спринклерная АУП с колбой активируется чуть больше чем за 6 с.

4.2. Спринклерная АУП активируется от срабатывания ДТПИ при паспортном значении $\theta_{\text{п}} = 5$ °С/мин = $0,08333$ °С/с и обладает инерционностью $t_{\text{и}} = 20$ с. Из выражений (20) и (21) получаем:

$$t_k = t_{\text{ДТПИ}} + t_{\text{и}} = 4,28 \cdot 10^{-4} \frac{10^5 \cdot 0,08333^3}{1^4 \cdot 2000^2} + 20 = 6,19 \cdot 10^{-9} + 20 \approx 20 \text{ с}.$$

Таким образом, при пожаре пролива ЛВЖ в данном помещении спринклерная АУП также может активироваться от ДТПИ.

Выводы

Получены выражения для экспресс-оценки эффективности спринклерной АУП при пожаре класса В и активации АУП от термического разрушения колбы как от нагрева ее восходящими продуктами горения, так и принудительно — от срабатывания ДТПИ. Эти подходы могут быть использованы специалистами пожарной охраны и других профильных организаций, занимающихся вопросами защиты помещений и зданий от пожара при проливах ЛВЖ/ГЖ, а также при внесении соответствующих дополнений в нормативные документы, касающиеся АУП.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Пожарная нагрузка. Справочник. СИТИС-СПН-1 : редакция 3. СИТИС, 2014. 51 с.
2. Драйздейл Д. Введение в динамику пожаров. М. : Стройиздат, 1990. 434 с.
3. Heskestad G. Fire plumes, flame height, and air entrainment // SFPE Handbook of Fire Protection Engineering. 3rd ed. Quincy MA : NFPA, 2002. Pp. 2-1–2-17.
4. Alpert R.L. Ceiling jet flows // SFPE Handbook of Fire Protection Engineering. 3rd ed. Quincy MA : NFPA, 2002. Pp. 2-18–2-31.
5. Ищенко А.Д., Ключ В.В., Польшко С.В., Таранцев А.А. О построении уточненного совмещенного графика для расчета сил и средств для тушения пожара // Пожаровзрывобезопасность/Fire and Explosion Safety. 2018. Т. 27. № 2–3. С. 82–92. DOI: 10.18322/PVB.2018.27.02-03.82-92
6. Танклевский Л.Т., Таранцев А.А., Зыбина О.А., Бабилов И.А. Об оценке эффективности спринклерной автоматической установки пожаротушения // Пожаровзрывобезопасность/Fire and Explosion Safety. 2021. Т. 30. № 1. С. 42–53. DOI: 10.22227/PVB.2021.30.01.42-53
7. Пузач С.В. Методы расчета тепломассообмена при пожаре в помещении и их применение при решении практических задач пожаровзрывобезопасности : монография. М. : Академия ГПС МЧС России, 2005. 336 с.
8. Drysdale D. An introduction to fire dynamics. Chichester : John Wiley and Sons, 1985. 424 p.
9. Heskestad G., Bill R.G.Jr. Quantification of thermal responsiveness of automatic sprinklers including conduction effects // Fire Safety Journal. 1988. Vol. 14. No. 1–2. Pp. 113–125. DOI: 10.1016/0379-7112(88)90049-5
10. Fleming R.P. Automatic sprinkler system calculations // SFPE Handbook of Fire Protection Engineering. 3rd ed. Quincy MA : NFPA, 2002. Pp. 4-72–4-87.

11. Танклевский Л.Т., Бабилов И.А., Таранцев А.А., Зыбина О.А. Об уточненной оценке координат очага пожара в помещении // Пожаровзрывобезопасность/Fire and Explosion Safety. 2020. Т. 29. № 3. С. 33–43. DOI: 10.22227/PVB.2020.29.03.33-43
12. Бабилов И.А., Танклевский А.Л., Таранцев А.А. О способе определения группы принудительно активируемых оросителей при возникновении пожара в помещении // Проблемы управления рисками в техносфере. 2019. № 3 (51). С. 34–41.
13. Tanklevskiy L., Kopylov S., Vasilev M., Zima V., Snegirev A. Advantages of electronically controlled sprinklers (ECS) for fire protection of tunnels // Proceedings from the Fifth International Symposium on Tunnel Safety and Security. New York, USA, March 14–16, 2012. New York, 2012. Vol. 1. Pp. 87–92.
14. National Fire Protection Association. NFPA Handbook, 15th 1981 Edition.
15. Tanklevskiy L., Vasiliev M., Meshman L., Snegirev A., Tsoi A. A novel methodology of electrically controlled sprinkler activation // Proceedings of the Thirteenth International Interflam Conference. 24–26 June 2013 London, UK. London, 2013. Pp. 503–508.
16. Tanklevskiy L., Kopylov S., Vasilev M., Zima V., Snegirev A. Advantages of electronically controlled sprinklers (ECS) for fire protection of tunnels // Proceedings from the Fifth International Symposium on Tunnel Safety and Security (New York, USA, 14–16th March, 2012), SP Technical Research Institute of Sweden. 2012. Vol. 1. Pp. 87–92.
17. Мешман Л.М., Цариченко С.Г., Былинкин В.А., Алешин В.В., Губин Р.Ю. Проектирование водяных и пенных автоматических установок пожаротушения / под общ. ред. Н.П. Копылова. М. : ВНИИПО МЧС РФ, 2002. 413 с.
19. Сафронов В.В., Аксенова Е.В. Выбор и расчет параметров установок пожаротушения и сигнализации : учеб. пособие. Орел : ОрлГТУ, 2004. 57 с.
20. Воронков О.Ю. Расчет, монтаж и эксплуатация автоматических установок пожаротушения : учеб. пособие. Омск : Изд-во ОмГТУ, 2016.
21. Илюшов Н.Я. Автоматические установки пожаротушения : учеб. пособие. Новосибирск : Изд-во НГТУ, 2016. 134 с.
22. Храпский С.Ф., Стариков В.И., Рысев Д.В. Производственная и пожарная автоматика : учеб. пособие. Омск : Изд-во ОмГТУ, 2013. 152 с.
23. Tsoi A., Snegirev A., Tanklevskiy L., Sheinman I. Flame suppression by water sprays: Exploring capabilities and failures of FDS // Proceedings of the Seventh International Seminar Fire and Explosion Hazards. Research Publishing Services, 2013. Pp. 482–491. DOI: 10.3850/978-981-07-5936-0_07-05
24. Yao C. Application of sprinkler technology. Presented at Workshop on Engineering Applications of Fire Technology. National Bureau of Standards. 1980.
25. Xin Y., Burchesky K., de Vries J., Magistrale H., Xiangyang Zhou, D'Aniello S. SMART Sprinkler Protection for Highly Challenging Fires — Part 1: System Design and Function Evaluation // Fire Technology. 2017. Vol. 53. No. 5. Pp. 1847–1884. DOI: 10.1007/s10694-017-0662-2
26. Таранцев А.А., Танклевский Л.Т., Снегирев А.Ю., Цой А.С., Копылов С.Н., Мешман Л.М. Оценка эффективности спринклерной установки пожаротушения // Пожарная безопасность/Fire Safety. 2015. № 1. С. 72–79.
27. Bullen M.L. The effect of a sprinkler on the stability of a smoke layer beneath a ceiling // Fire Technology. 1977. Vol. 13. No. 1. Pp. 21–34. DOI: 10.1007/bf02338883
28. Груданова О.В., Таранцев А.А., Королева Л.А. Об экономической оценке двух путей модернизации автоматических установок пожаротушения // Проблемы управления рисками в техносфере. 2007. № 1. С. 38–42.
29. Бубырь Н.Ф., Воробьев Р.П., Быстров Ю.В., Зуйков Г.М. Эксплуатация установок пожарной автоматики / под ред. Н.Ф. Бубыря. М. : Стройиздат, 1986. 367 с.
30. Малинин В.Р., Коробейникова Е.Г. Категорирование помещений и зданий по взрывопожарной и пожарной опасности : учеб. пособие. СПб. : СПбУ МВД России, 2002. 82 с.
31. Демидович Б.П., Марон И.А., Шувалова Э.З. Численные методы анализа. 3-е изд., перераб. М. : Наука, 1967. 368 с.
32. Камке Э. Справочник по обыкновенным дифференциальным уравнениям. 5-е изд., стереотипное. М. : Наука, 1976. 576 с.
33. Хасанов И.Р., Карпов А.В., Лобова С.Ф., Петрова Н.В. Полевое моделирование динамики пожара при ответе на вопрос о выполнении системой пожарной сигнализации своих функций // Пожаровзрывобезопасность/Fire and Explosion Safety. 2020. Т. 29 (5). С. 40–50. DOI: 10.22227/PVB.2020.29.05.40-50

34. Горбань Ю.И., Немчинов С.Г. Пожарные роботы в пожарной автоматике: научно-технические исследования, алгоритмы поведения и дизайн // Пожаровзрывобезопасность/Fire and Explosion Safety. 2020. Т. 29 (5). С. 82–88.
35. Мешман Л.М. Частные вопросы при проектировании водяных АУП // Пожаровзрывобезопасность/Fire and Explosion Safety. 2019. Т. 28 (1). С. 80–88.
36. Мешман Л.М. Влияние проектного значения интенсивности орошения диктующего оросителя на гидравлические параметры распределительной сети АУП // Пожаровзрывобезопасность/Fire and Explosion Safety. 2019. Т. 28 (2). С. 93–97.

REFERENCES

1. Fire load. Handbook. SITIS-SPN-1 : revision 3. SITIS, 2014; 51. (rus).
2. Drysdale D. *Introduction to fire dynamics*. Moscow, Stroyizdat Publ., 1990; 434. (rus).
3. Heskestad G. Fire Plumes, Flame Height, and Air Entrainment. *SFPE Handbook of Fire Protection Engineering*. 3rd ed. Quincy MA, NFPA, 2002; 2-1-2-17.
4. Alpert R.L. Ceiling Jet Flows. *SFPE Handbook of Fire Protection Engineering*. 3rd ed. Quincy MA, NFPA, 2002; 2-18-2-31.
5. Ishchenko A.D., Klyuy V.V., Polynko S.V., Tarantsev A.A. About building a revised combined graphics the calculation of forces and means to extinguish the fire. *Pozharovzryvobezopasnost/Fire and Explosion Safety*. 2018; 27(2-3):82-92. DOI: 10.18322/PVB.2018.27.02-03.82-92 (rus).
6. Tanklevskiy L.T., Tarantsev A.A., Zybina O.A., Babikov I.A. The efficiency assessment of an automatic sprinkler system. *Pozharovzryvobezopasnost/Fire and Explosion Safety*. 2021; 30(1):42-53. DOI: 10.22227/PVB.2021.30.01.42-53 (rus).
7. Puzach S.V. *Calculation methods of heat and mass transfer in a fire in a room and their application in solving practical problems of fire and explosion safety : monograph*. Moscow, Academy of State Fire Service of the Ministry of Emergency Situations of Russia, 2005; 336. (rus).
8. Drysdale D. *An introduction to fire dynamics*. Chichester, John Wiley and Sons, 1985; 424.
9. Heskestad G., Bill R.G., Jr. Quantification of thermal responsiveness of automatic sprinklers including conduction effects. *Fire Safety Journal*. 1988; 14(1-2):113-125. DOI: 10.1016/0379-7112(88)90049-5
10. Fleming R.P. Automatic sprinkler system calculations. *SFPE Handbook of Fire Protection Engineering*. 3rd ed. Quincy MA, NFPA, 2002; 4-72-4-87.
11. Tanklevskiy L.T., Babikov I.A., Tarantsev A.A., Zybina O.A. On a more precise assessment of coordinates of the seat of fire in the premises. *Fire and Explosion Safety*. 2020; 29(3):33-43. DOI: 10.22227/PVB.2020.29.03.33-43 (rus).
12. Babikov I.A., Tanklevskiy A.L., Tarantsev A.A. Determination method of sprinklers with electrical activation in case of internal fire. *Problems of risk management in the technosphere*. 2019; 3(51):34-41. (rus).
13. Tanklevskiy L., Kopylov S., Vasilev M., Zima V., Snegirev A. Advantages of electronically controlled sprinklers (ECS) for fire protection of tunnels. *Proceedings from the Fifth International Symposium on Tunnel Safety and Security, New York, USA, March 14–16, 2012*. New York, 2012; 1:87-92.
14. *National fire protection association. NFPA Handbook*, 15th 1981 Edition.
15. Tanklevskiy L., Vasilev M., Meshman L., Snegirev A., Tsoi A. A novel methodology of electrically controlled sprinkler activation. *Proceedings of the Thirteenth International Interflam Conference. 24–26 June 2013 London, UK*. London, 2013; 503-508.
16. Tanklevskiy L., Kopylov S., Vasilev M., Zima V., Snegirev A. Advantages of electronically controlled sprinklers (ECS) for fire protection of tunnels. *Proceedings from the Fifth International Symposium on Tunnel Safety and Security (New York, USA, 14-16th March, 2012)*. SP Technical Research Institute of Sweden, 2012; 1:87-92.
17. Meshman L.M., Tsarichenko S.G., Bylinkin V.A., Aleshin V.V., Gubin R.Y. *Design of water and foam automatic fire extinguishing systems*; N.P. Kopylov (ed.). VNIPO, 2002; 413. (rus).
19. Safronov V.V., Aksenova E.V. *Selection and calculation of parameters of fire extinguishing and alarm systems : textbook*. Orel, Orel State Technical University, 2004. (rus).
20. Voronkov O.Y. *Calculation, installation and operation of automatic fire-extinguishing installations : textbook*. Omsk, Publishing house OmSTU, 2016. (rus).
21. Ilyushov N.Ya. *Automatic fire extinguishing installations : textbook*. Novosibirsk, Publishing house of NSTU, 2016; 134. (rus).
22. Khrapsky S.F., Starikov V.I., Ryssev D.V. *Industrial and fire automation: textbook*. Omsk, Publishing house of OmSTU, 2013; 152. (rus).

23. Tsoi A., Snegirev A., Tanklevskiy L., Sheinman I. Flame suppression by water sprays: Exploring capabilities and failures of FDS. *Proceedings of the Seventh International Seminar Fire and Explosion Hazards*. Research Publishing Services, 2013; 482-491. DOI: 10.3850/978-981-07-5936-0_07-05
24. Yao C. Application of sprinkler technology. *Presented at Workshop on Engineering Applications of Fire Technology*. National Bureau of Standards. 1980.
25. Xin Y., Burchesky K., de Vries J., Magistrale H., Xiangyang Zhou, D'Aniello S. SMART Sprinkler Protection for Highly Challenging Fires — Part 1: System Design and Function Evaluation // *Fire Technology*. 2017. Vol. 53. No. 5. Pp. 1847–1884. DOI: 10.1007/s10694-017-0662-2
26. Tarantsev A.A., Tanklevsky L.T., Snegirev A.Y., Tsoy A.S., Kopylov S.N., Meshman L.M. Assessment of the sprinkler installation efficiency. *Pozharnaya bezopasnost'/Fire Safety*. 2015; 1:72-79. (rus).
27. Bullen M.L. The effect of a sprinkler on the stability of a smoke layer beneath a ceiling. *Fire Technology*. 1977; 13(1):21-34. DOI: 10.1007/bf02338883
28. Grudanov O.V., Tarantsev A.A., Koroleva L.A. On economic evaluation of two ways of modernization of automatic fire extinguishing installations. *Problems of risk management in the technosphere*. 2007; 1:38-42. (rus).
29. Buby N.F., Vorobyev R.P., Bystrov Y.V., Zuikov G.M. *Operation of the fire-fighting automatic installations*; Buby N.F. (ed.). Moscow, Stroyizdat Publ., 1986; 367. (rus).
30. Malinin V.R., Korobeinikova E.G. *Categorization of premises and buildings according to explosion and fire hazard : textbook*. Saint-Petersburg: Saint-Petersburg University of the Ministry of Internal Affairs of Russia, 2002; 82. (rus).
31. Demidovich B.P., Maron I.A., Shuvalova E.Z. *Numerical methods of analysis*. 3rd ed., revised. Moscow, Nauka Publ., 1967; 368. (rus).
32. Kamke E. *Handbook of ordinary differential equations*. 5th ed., stereotyped. Moscow, Nauka Publ., 1976; 576. (rus).
33. Khasanov I.R., Karpov A.V., Lobova S.F., Petrova N.V. Field modeling of the fire dynamics as an answer to the question about the fire alarm performance. *Pozharovzryvbezopasnost/Fire and Explosion Safety*. 2020; 29(5):40-50. DOI: 10.22227/PVB.2020.29.05.40-50 (rus).
34. Gorban Yu.I., Nemchinov S.G. Fire-fighting robots are in the fire automation: science and technology studies, the behavior of algorithms and design. *Pozharovzryvbezopasnost/Fire and Explosion Safety*. 2020; 29(5):82-88. (rus).
35. Meshman L.M. Special issues on design water AFEI. *Pozharovzryvbezopasnost/Fire and Explosion Safety*. 2019; 28(1):80-88. (rus).
36. Meshman L.M. Effect of irrigation intensity design value dictating the sprinkler on the hydraulic parameters of the distribution network AFES. *Pozharovzryvbezopasnost/Fire and Explosion Safety*. 2019; 28(2):93-97. (rus).

Поступила 02.02.2021, после доработки 19.02.2021; принята к публикации 04.03.2021
 Received February 02, 2021; Received in revised form February 19, 2021;
 Accepted March 4, 2021

Информация об авторах

ТАНКЛЕВСКИЙ Леонид Тимофеевич, д-р техн. наук, профессор, заведующий кафедрой Высшей школы техносферной безопасности, Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого; главный научный сотрудник, Санкт-Петербургский университет Государственной противопожарной службы Министерства Российской Федерации по делам гражданской обороны, чрезвычайным ситуациям и ликвидации последствий стихийных бедствий, г. Санкт-Петербург, Российская Федерация; РИНЦ ID: 181476; Scopus Author ID: 57192367552; ResearcherID: S-1901-2017; ORCID: 0000-0002-2769-0086; e-mail: tanklevskiy@gefest-spb.ru

Information about the authors

Leonid T. TANKLEVSKIY, Dr. Sci. (Eng.), Professor, Head of Department of Higher School of Technosphere Safety, Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University; Chief of Research Officer, Saint-Petersburg University of State Fire Service of the Ministry of the Russian Federation for Civil Defense, Emergencies and Elimination on Consequences of Natural Disasters, Saint Petersburg, Russian Federation; ID RISC: 181476; Scopus Author ID: 57192367552; ResearcherID: S-1901-2017; ORCID: 0000-0002-2769-0086; e-mail: tanklevskiy@gefest-spb.ru

ТАРАНЦЕВ Александр Алексеевич, д-р техн. наук, профессор, заведующий лабораторией, Институт проблем транспорта им. Н.С. Соломенко Российской академии наук; профессор, Санкт-Петербургский университет Государственной противопожарной службы Министерства Российской Федерации по делам гражданской обороны, чрезвычайным ситуациям и ликвидации последствий стихийных бедствий, г. Санкт-Петербург, Российская Федерация; РИНЦ ID: 664653; Scopus Author ID: 57195636448; ResearcherID: K-2087-2018; ORCID: 0000-0003-1561-2483; e-mail: t__54@mail.ru

БАБИКОВ Игорь Александрович, аспирант Высшей школы техносферной безопасности, Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого, г. Санкт-Петербург, Российская Федерация; РИНЦ ID: 949758; Scopus Author ID: 57205082476; ResearcherID: S-5502-2017; ORCID: 0000-0003-4100-1686; e-mail: babikovia@gmail.com

ПОЛЯКОВ Дмитрий Витальевич, заместитель начальника кафедры, Академия Государственной противопожарной службы Министерства Российской Федерации по делам гражданской обороны, чрезвычайным ситуациям и ликвидации последствий стихийных бедствий, г. Москва, Российская Федерация; РИНЦ ID: 769985; ORCID: 0000-0001-8592-3047; e-mail: gost-r01@yandex.ru

Alexander A. TARANTSEV, Dr. Sci. (Eng.), Professor, Head of Laboratory, Solomenko Institute of Transport Problems of the Russian Academy of Sciences; Professor, Saint-Petersburg University of State Fire Service of the Ministry of the Russian Federation for Civil Defense, Emergencies and Elimination on Consequences of Natural Disasters, Saint Petersburg, Russian Federation; ID RISC: 664653; Scopus Author ID: 57195636448; ResearcherID: K-2087-2018; ORCID: 0000-0003-1561-2483; e-mail: t__54@mail.ru

Igor A. BABIKOV, Graduate Student of Department of Higher School of Technosphere Safety, Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University, Saint Petersburg, Russian Federation; ID RISC: 949758; Scopus Author ID: 57205082476; ResearcherID: S-5502-2017; ORCID: 0000-0003-4100-1686; e-mail: babikovia@gmail.com

Dmitriy V. POLIAKOV, Deputy Head of Department, The State Fire Academy of the Ministry of Russian Federation for Civil Defense, Emergencies and Elimination on Consequences of Natural Disasters, Moscow, Russian Federation; ID RISC: 769985; ORCID: 0000-0001-8592-3047; e-mail: gost-r01@yandex.ru

ПРАВИЛА ДЛЯ АВТОРОВ!

Направляемые в журнал «ПОЖАРОВЗРЫВБЕЗОПАСНОСТЬ/FIRE AND EXPLOSION SAFETY» статьи должны содержать результаты научных исследований и испытаний, описания новых технических устройств и программно-информационных продуктов; обзоры, комментарии к нормативно-техническим документам, справочные материалы и т.п. Авторы должны указать, к какому типу относится их статья:

- научно-теоретическая;
- научно-эмпирическая;
- аналитическая (обзорная);
- дискуссионная;
- рекламная.

Не допускается направлять в редакцию работы, которые были опубликованы и/или приняты к печати в других изданиях.

Редакция просит авторов при подготовке рукописи руководствоваться изложенными ниже правилами.

1. Статья и сопутствующие ей материалы должны быть направлены через электронную редакцию по адресу info@fire-smi.ru.

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

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

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

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

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

Материал статьи должен излагаться в следующем порядке.

2.1. Номер УДК (универсальная десятичная классификация).

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

2.3. Информация об авторах.

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

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

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

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

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

2.3.3. ORCID, Researcher ID, Scopus Author ID.

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

В описании источников необходимо указывать всех авторов.

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

Список литературы должен содержать не менее 20 источников (в это число не входят нормативные документы, патенты, ссылки на сайты компаний и т.п.). При этом количество ссылок на статьи из иностранных научных журналов и другие иностранные источники должно быть не менее 40 % от общего количества ссылок. Не более половины от оставшихся 60 % должны составлять статьи из русскоязычных научных журналов, остальное — другие первоисточники на русском языке.

Не менее половины источников должно быть включено в один из ведущих индексов цитирования: Российский индекс научного цитирования eLibrary, Web of Science, Scopus, Chemical Abstracts, MathSciNet, Springer и др. В случае присвоения публикациям цифрового идентификатора объекта (DOI) его необходимо указать, что позволит однозначно идентифицировать объект в базах данных.

Состав источников должен быть актуальным и содержать не менее половины современных (не старше 10 лет) статей из научных журналов или других публикаций.

В списке литературы должно быть не более 30 % источников, автором либо соавтором которых является автор статьи.

Следует обратить внимание на публикации диссертаций (особенно докторских), защищенных в последние годы по ближайшей научной специальности или группе специальностей. Для поиска рекомендуется использовать ресурс <http://www.dissercat.com>.

Не следует включать в список литературы ГОСТы; ссылки на них должны быть даны непосредственно по тексту статьи.

Убедитесь, что указанная в списке литературы информация (Ф.И.О. автора, название книги или журнала, год издания, том, номер и количество (интервал) страниц) верна.

Неопубликованные результаты, проекты документов, личные сообщения и т.п. не следует указывать в списке литературы, но они могут быть упомянуты в тексте.

2.8. References (пристатейные списки литературы на английском языке). Представление в References только транслитерированного (без перевода) описания недопустимо. Обращаем Ваше внимание, что перевод названия статей следует давать так, как он проходил при их публикации, а перевод названий журналов должен быть официально принятым. Произвольное сокращение названий источников цитирования приведет к невозможности идентифицировать ссылку в электронных базах данных.

При составлении References необходимо следовать схеме:

- ИОФ авторов (транслитерация; для ее написания используйте сайт <http://fotosav.ru/services/transliteration.aspx>, обязательно включив в настройках справа сверху флажок «Американская (для визы США)»; если автор цитируемой статьи имеет свой вариант транслитерации своей фамилии, следует использовать этот вариант);
- заглавие на английском языке — для статьи, транслитерация и перевод названия — для книги;
- название источника (журнала, сборника статей, материалов конференции и т.п.) в транслитерации и на английском языке (курсивом, через косую черту);
- выходные данные;
- указание на язык изложения материала в скобках (например, (in Russian)).

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

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

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

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

5. Непринятые к публикации статьи автору не возвращаются. Просьба редакции о переработке материала не означает, что он принят к печати. Предпечатная подготовка статей оплачивается за счет средств подписчиков и третьих лиц, заинтересованных в публикации.

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