



ОЦЕНКА ВОЗМОЖНОСТИ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ
РАЗЛИЧНЫХ СРЕДСТВ ПОЖАРОТУШЕНИЯ
В ВЫСОТЫХ ЗДАНИЯХ





УЧРЕДИТЕЛЬ и ИЗДАТЕЛЬ —

ФГБОУ ВО «Национальный
исследовательский
Московский государственный
строительный университет»

Адрес:

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

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

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

Префикс DOI: 10.22227

РЕДАКЦИЯ:

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

Адрес редакции:

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

Адрес для переписки:

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

Тел./факс: +7 (495) 287-49-14
доб. 14-23

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 26.08.2022.

Выход в свет 31.08.2022.

Формат 60 × 84 1/8. Тираж 2000 экз.

Бумага мелованная матовая.

Печать офсетная. Цена свободная.

Распространяется по подписке.

Отпечатано в типографии

Издательства МИСИ — МГСУ

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

Фото для оформления журнала взяты с сайтов: www.ro.wikipedia.org,
www.pxhere.com

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, Ньютаунбери, Велико-
британия)

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

РЕДАКЦИОННАЯ КОЛЛЕГИЯ:

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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 России,
Балашиха Московской обл., Россия)

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

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

СОДЕРЖАНИЕ

БЕЗОПАСНОСТЬ ВЕЩЕСТВ И МАТЕРИАЛОВ

А.А. КОБЕЛЕВ, Ю.К. НАГАНОВСКИЙ,
Е.Ю. КРУГЛОВ, Р.М. АСЕЕВА, Е.М. ШАПИХОВ
Пиролиз гибридной полиуретано-неорганической
теплоизоляции: термогравиметрический анализ
и Фурье ИК-спектры

5

МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ, ЧИСЛЕННЫЕ МЕТОДЫ И КОМПЛЕКСЫ ПРОГРАММ

Р.Р. ШАНГАРАЕВ
Апробация вычислительной методики
определения тепловых нагрузок при авариях,
сопровождающихся огневыми шарами

16

БЕЗОПАСНОСТЬ ЗДАНИЙ, СООРУЖЕНИЙ, ОБЪЕКТОВ

Г.Т. ЗЕМСКИЙ, Л.П. ВОГМАН,
Н.В. КОНДРАТЮК, Д.А. КОРОЛЬЧЕНКО
Анализ методов определения коэффициента участия
горючих газов и паров во взрыве при установлении
категории помещения по взрывопожарной
и пожарной опасности

27

БЕЗОПАСНОСТЬ ЖИЗНЕДЕЯТЕЛЬНОСТИ

Д.А. САМОШИН, Р.Н. ИСТРАТОВ, М.М. ШАРАНОВА,
В.А. КОЧЕТЫГОВ, С.В. ТОМИН, А.Г. ФРОЛОВ
Исследование времени начала эвакуации
людей в жилых многоквартирных зданиях
без систем оповещения о пожаре

38

С.П. КАЛМЫКОВ
Влияние размеров ячеек вычислительной сетки
и неоднородности вычислительной области
на расчетное время обнаружения пожара

56

АВТОМАТИЗИРОВАННЫЕ СИСТЕМЫ И СРЕДСТВА

М.В. АЛЕШКОВ, О.В. ДВОЕНКО, А.С. ГУМИРОВ,
А.И. СОКОВНИН, М.В. СЕРЕГИН, И.О. СЕМЕНЮК,
С.Г. ЦАРИЧЕНКО
Оценка возможности использования
различных средств пожаротушения
в высотных зданиях

65

ВОПРОС – ОТВЕТ

А.С. ХАРЛАМЕНКОВ
Системы защиты ячеек и батарейных блоков
с литий-ионными аккумуляторами. Часть 1

76

CONTENTS

SAFETY OF SUBSTANCES AND MATERIALS

A. A. KOBEL'EV, Yu. K. NAGANOVSKIY, E. Yu. KRUGLOV,
R. M. ASE'eva, E. M. SHAPIKHOV
Pyrolysis of hybrid polyurethane inorganic
thermal insulation: thermogravimetric analysis
and FTIR spectra

MATHEMATICAL MODELING, NUMERICAL METHODS AND PROGRAM COMPLEXES

R. R. SHANGARAEV
Approval of a computational method
for determining thermal loads during
accidents accompanied by fireballs

SAFETY OF BUILDINGS, STRUCTURES, OBJECTS

G. T. ZEMSKIY, L. P. VOGMAN,
N. V. KONDRATYUK, D. A. KOROLCHENKO
Analysis of methods used to identify combustible gas
and vapour-related factors contributing to explosions
in the context of assigning explosion and fire safety
categories to premises

LIFE SAFETY

D. A. SAMOSHIN, R. N. ISTRATOV, M. M. SHARANOVA,
V. A. KOCHETYGOV, S. V. TOMIN, A. G. FROLOV
Researches of the pre-evacuation time
of people in residential multi-storey buildings
without fire warning systems

S. P. KALMYKOV
Effect of computational grid cell size
and heterogeneity of computing area
for estimated fire detection time

AUTOMATED SYSTEMS AND MEANS

M. V. ALESHKOV, O. V. DVOENKO, A. S. GUMIROV,
A. I. SOKOVNIN, M. V. SEREGIN, I. O. SEMENYUK,
S. G. TSARICHENKO
Assessment of the possibility of using
various fire extinguishing means
in high-rise buildings

QUESTION – ANSWER

A. S. KHARLAMENKOV
Systems for protecting cells and batteries
with lithium-ion batteries. Part 1

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.



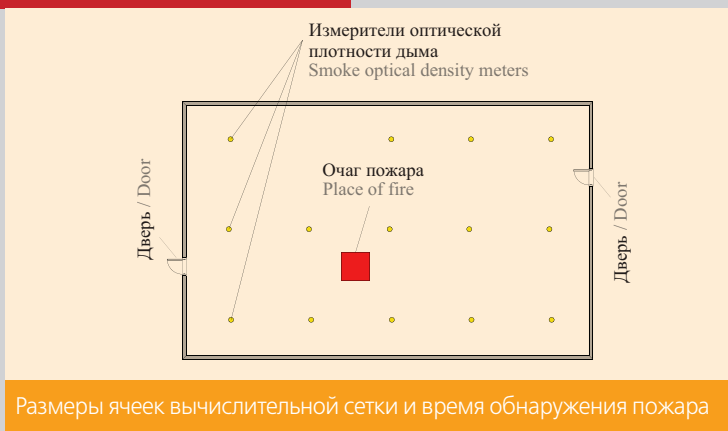
Тепловые нагрузки при авариях с огневыми шарами

Стр. 16



Стр. 38

Время начала эвакуации в жилых зданиях без систем оповещения



Размеры ячеек вычислительной сетки и время обнаружения пожара

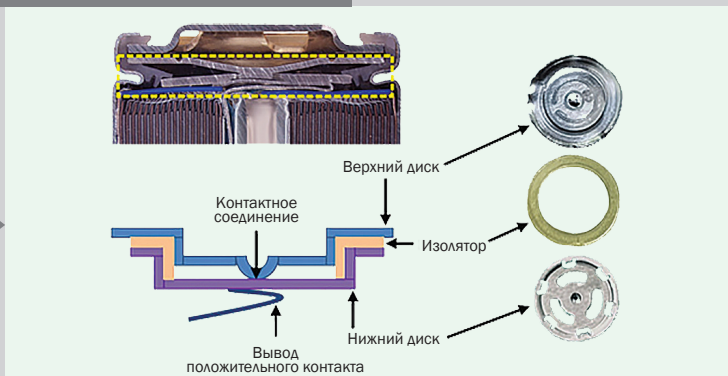
Стр. 56



Стр. 65

Использование средств пожаротушения в высотных зданиях

Стр. 76



Системы защиты ячеек и батарейных блоков



FOUNDER and PUBLISHER —

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

Address:

26 Yaroslavskoe shosse, Moscow,
129337, Russia

Journal founded in 1992,
issued 6 times per year.

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

DOI prefix: 10.22227.

EDITORIAL STAFF:

Executive editor **Yudicheva A.A.**

Editor **Korzukhina L.B.**

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

Corrector **Ermikhina O.V.**

Layout **Aleynikova A.G.**

Address of Editorial Staff:

26 Yaroslavskoe shosse, Moscow,
129337, Russia

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

Phone/Fax: +7 (495) 287-49-14
add. 14-23.

E-mail: info@fire-smi.ru

https://www.fire-smi.ru

"Pozharovzryvbezopasnost/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 26.08.2022.

Date of publication 31.08.2022.

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
(Semenov Institute of Chemical Physics of Russian Academy of Sciences, Moscow, Russia)

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

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

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)

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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)

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)

Пиролиз гибридной полиуретано-неорганической теплоизоляции: термогравиметрический анализ и Фурье ИК-спектры

Артём Александрович Кобелев¹✉, Юрий Кузьмич Нагановский²,
Евгений Юрьевич Круглов¹, Роза Михайловна Асеева¹, Еркебулан Маратович Шапихов¹

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

² Всероссийский ордена «Знак Почета» научно-исследовательский институт противопожарной обороны Министерства Российской Федерации по делам гражданской обороны, чрезвычайным ситуациям и ликвидации последствий стихийных бедствий, Московская обл., г. Балашиха, Россия

АННОТАЦИЯ

Введение. Целью данной работы является изучение процесса термического разложения (пиролиза) двух образцов гибридного органо-неорганического теплоизоляционного материала (ОНМ) на основе данных, полученных методами термогравиметрического анализа и ИК-Фурье спектроскопии.

Поставленная цель предопределила следующие задачи исследования: выявить основную химическую структуру образцов ОНМ (по функциональным группам), изучить порядок процессов в материалах при нагревании в азоте, рассчитать энергию активации, предэкспоненциальный множитель, определить механизм пиролиза.

Материалы и методы. В работе использовались методы термогравиметрического анализа и ИК-Фурье спектроскопии. Образцы для спектроскопического анализа готовили в процессе термогравиметрических испытаний по методу «заморозки» эксперимента.

Результаты и их обсуждение. В работе исследованы структурные особенности двух образцов гибридной полиуретано-неорганической теплоизоляции и прослежены физико-химические процессы, протекающие при их нагревании в динамических условиях в атмосфере азота до 750 °С.

Показан многостадийный характер пиролиза обоих образцов гибридного теплоизоляционного материала. Пиролиз первого образца является трехстадийным процессом. У второго образца разложение протекает в две стадии. Все стадии являются эндотермическими. Это указывает на преобладание энергетических затрат на разрыв связей между органической и неорганической частями и другие выводы.

Установлено, что пиролиз образцов ОНМ на всех стадиях осуществляется по механизму нуклеации и росту ядер (активных центров деструкции) по закону случая $R(1)$. Анализ Фурье ИК-спектров образцов показал, что оба образца изготовлены с применением изоцианатов алифатического типа Desmodur.

Выводы. В работе изучены химическая структура и физико-химические превращения при нагревании новой группы материалов — гибридных органо-неорганических теплоизоляционных материалов. Статья является продолжением работы коллектива авторов по систематическому исследованию термического поведения современных видов полимерной теплоизоляции.

Ключевые слова: гибридные материалы; термический анализ; механизм пиролиза; макрокинетические параметры; энергия активации

Для цитирования: Кобелев А.А., Нагановский Ю.К., Круглов Е.Ю., Асеева Р.М., Шапихов Е.М. Пиролиз гибридной полиуретано-неорганической теплоизоляции: термогравиметрический анализ и Фурье ИК-спектры // Пожаровзрывобезопасность/Fire and Explosion Safety. 2022. Т. 31. № 4. С. 5–15. DOI: 10.22227/0869-7493.2022.31.04.5-15

✉ Кобелев Артём Александрович, e-mail: artemkobelev@gmail.com

Pyrolysis of hybrid polyurethane inorganic thermal insulation: thermogravimetric analysis and FTIR spectra

Artem A. Kobelev¹✉, Yuriy K. Naganovskiy², Evgeniy Yu. Kruglov¹, Roza M. Aseeva¹, Erkebulan M. Shapikhov¹

¹ The State Fire Academy of the Ministry of Russian Federation for Civil Defense, Emergencies and Elimination on Consequences of Natural Disasters, Moscow, Russian Federation

² All-Russian Research Institute for Fire Protection of Ministry of Russian Federation for Civil Defense, Emergencies and Elimination of Consequences of Natural Disasters, Balashikha, Moscow Region, Russian Federation

ABSTRACT

Purpose. The purpose of this work is to study the process of thermal decomposition (pyrolysis) of two samples of a hybrid organic-inorganic (OIH) heat-insulating material based on data obtained by thermogravimetric analysis and IR-Fourier spectrometry.

The goal set predetermined the following research tasks: to find out the basic chemical structure of the OIH samples (by functional groups), to study the order of processes in materials when heated in nitrogen, to calculate the activation energy, the pre-exponential factor, to determine the pyrolysis mechanism.

Methods. The methods of thermogravimetric analysis and IR-Fourier spectrometry were used in the work. Samples for spectrometric analysis were prepared in the process of thermogravimetric tests using the "freezing" experiment method.

Results and discussion. The paper studies the structural features of two samples of hybrid polyurethane-inorganic (OIH) thermal insulation material and traces the physicochemical processes that occur when they are heated under dynamic conditions in a nitrogen atmosphere up to 750 °C.

The multi-stage nature of the pyrolysis of the OIH material is shown. The pyrolysis of the first sample is a three-stage process. For the second sample, decomposition proceeds in two stages. All stages are endothermic. This indicates the predominance of energy costs for breaking bonds between the organic and inorganic parts and other conclusions.

It has been established that the pyrolysis of OIH samples at all stages is carried out according to the mechanism of nucleation and the growth of nuclei (active centers of destruction). Analysis of the IR spectra of the samples showed that both samples were prepared using Desmodur aliphatic isocyanates.

Conclusions. The paper studies the chemical structure and physicochemical changes when heating the new group of materials — hybrid organic-inorganic (OIH) heat-insulating materials. The article is a continuation of a team of authors systematic study of a thermal behavior of modern types of polymer thermal insulation.

Keywords: hybrid materials; thermal analysis; pyrolysis mechanism; macrokinetic parameters; activation energy

For citation: Kobelev A.A., Naganovskiy Yu.K., Kruglov E.Yu., Aseeva R.M., Shapikhov E.M. Pyrolysis of hybrid polyurethane inorganic thermal insulation: thermogravimetric analysis and FTIR spectra. *Pozharovzryvobezopasnost/Fire and Explosion Safety*. 2022; 31(4):5-15. DOI: 10.22227/0869-7493.2022.31.04.5-15 (rus).

✉ Artem Aleksandrovich Kobelev, e-mail: artemkobelev@gmail.com

Введение

Сочетание в одном материале органической и неорганической составляющей расширяет область применения тех органических и неорганических материалов, которые традиционно применяются в других сочетаниях и даже других областях. Такие материалы называются «органо-неорганические гибриды» (ОНМ) [1, 2]. Термин «гибрид» можно применять не только для материалов, но и конструкций.

При разработке подобных материалов используют знания всех областей химии (органической, полимерной, физической, биологической, химии твердого тела, химии материалов). Такой «сквозной» подход позволяет создавать большое разнообразие сложных систем различной формы, размера с заданным соотношением органической и неорганической частей, пористостью, функциональностью и морфологией. Такие инновационные материалы могут быть использованы по назначению напрямую или в качестве прекурсоров для новых неорганических твердых веществ с перспективой использования в оптике, электронике, ионике, механике, катализе, строительстве, производстве защитных покрытий и мембран и т.д. В отличие от механически наполненных неорганическими соединениями материалов, обладающими слабыми физическими связями взаимодействия, истинные гибридные материалы характеризуются наличием сильных связей между органической и неоргани-

ческой матрицами. Образование таких связей происходит по функциональным группам у исходных органических и неорганических прекурсоров — OH, —COOH, —NH₂, —N=C=O. Одним из популярных методов в получении гибридных материалов является золь-гель синтез [1, 3]. Золь-гель процесс позволяет объединять в одной фазе органические и неорганические материалы. Получаемые в результате гибридные органо-неорганические пористые материалы имеют высокие упругопластические свойства, низкую теплопроводность и другие важные улучшения структуры [4–10].

В предыдущих работах нами показана эффективность направления снижения пожарной опасности теплоизоляционных полимерных материалов путем создания гибридных органо-неорганических систем на основе силика-аэрогеля [11, 12]. Сравнительный анализ поведения двух образцов гибридной полиуретано-неорганической теплоизоляции при нагревании в среде воздуха до высокой температуры показал их существенное различие, несмотря на относительно близкую объемную плотность [11]. Пенополиуретановые материалы (ППУ) подразделяются на эластичные (гибкие) и жесткие. Области их применения различны. Но в том и другом случаях рецептуры для получения ППУ включают большой набор компонентов, выполняющих определенные функции (основные реагенты, катализаторы, вспени-

вающие агенты, поверхностно-активные вещества, стабилизаторы, антипирены, наполнители и прочее). Рецептурные и технологические характеристики использованных нами образцов гибридной ПУ-неорганической теплоизоляции по понятным причинам нам не известны.

Целью данной работы является изучение процесса термического разложения (пиролиза) двух образцов гибридного органо-неорганического теплоизоляционного материала на основе данных, полученных методами термогравиметрического анализа и ИК-Фурье спектроскопии.

Поставленная цель предопределила следующие задачи исследования: выяснить основную химическую структуру образцов ОНМ (по функциональным группам), изучить порядок процессов в материалах при нагревании в азоте, рассчитать энергию активации, предэкспоненциальный множитель, определить механизм пиролиза. Это позволит дать глубокое описание процесса горения выбранных материалов.

С практической точки зрения полученные результаты позволят прогнозировать поведение этих материалов в условиях пожара, аналитически определять их пожароопасные и теплофизические свойства. Полученные параметры могут быть использованы при моделировании пожара с участием выбранных материалов.

Материалы и методы

Объектом исследования служили образцы гибридной ПУ-неорганической теплоизоляции, используемые в работе [11, 12]. В частности, взяты два образца теплоизоляции южно-корейского производства с объемной плотностью 59,2 кг/м³ (далее — первый образец) и 69,2 кг/м³ (далее — второй образец). Для термогравиметрического анализа (ТГА) применяли термоанализатор DuPont 9900 с модулями термовесов TGA-951 и DSC Q600. Образцы массой 4–7 мг нагревали со скоростью 5, 10 и 20 град./мин в инертной (азот) среде до 750 °С с последующей сменой атмосферы на воздушную и нагревом до 850 °С. Замена инертной среды в ТГА на воздушную и дополнительный нагрев позволяют оценить содержание неорганического компонента в гибридной теплоизоляции. Пиролиз образцов гибридной ПУ-неорганической теплоизоляции является многостадийным процессом, также как и при термоокислительной деструкции [11, 12]. Для спектроскопического анализа исходного образца и твердых продуктов деструкции применяли ИК-Фурье спектрометр Nicolet iS5 с приставкой НПВО (нарушенного полного внутреннего отражения) и алмазным кристаллом. В этом случае предварительная пробоподготовка образца не требуется. ИК-спек-

тры в диапазоне 4000–500 см⁻¹ снимали путем прижатия образца к кристаллу алмаза. Обработку полученных спектров проводили с помощью специализированного программного обеспечения OMNIC. Образцы для определения структурных изменений при нагревании со скоростью 20 °С/мин готовили методом «заморозки» эксперимента. В реперных точках, которые отвечали температуре максимальной скорости потери массы на каждой стадии, испытание приостанавливали, контейнер с образцом выводили из зоны нагрева и полностью охлаждали. Атмосферу до полного остывания образца поддерживали инертной (азот) или окислительной (воздух) соответственно. После остывания образец извлекали из контейнера и направляли на ИК-Фурье исследование. Расчет макрокинетических параметров и определение механизма процесса разложения осуществляли по методологии, используемой ранее [11, 13].

Результаты и их обсуждение

Сочетание термического анализа и ИК-спектроскопии является мощным инструментом для изучения структуры и свойств материалов. В данном случае сразу можно отметить, что при нагревании в динамических условиях до 850 °С на воздухе образцы гибридной ПУ-неорганической теплоизоляции сохраняют после разложения около 40 % стекловидной пористой массы [11]. Поэтому полагаем, что важной составляющей гибридной теплоизоляции является неорганика кремнеземного типа, а именно силикааэрогель, наиболее часто используемый и доступный для промышленного производства материал. Технологический процесс получения гибридных ОНМ состоит в проведении реакций гидролиза и конденсации неорганического прекурсора, последующей реакции с органическим компонентом в присутствии разных целевых добавок.

Основными прекурсорами SiO₂ матрицы часто являются так называемое жидкое стекло, олигомерные силикаты [14], а также алкоксисиланы и их производные [4]. Полагают, что в ходе синтеза силикааэрогеля вначале образуются цепные, затем двумерные ленточные и трехмерные структуры SiO₂ каркасного типа [14–16].

ИК-Фурье спектроскопию достаточно часто применяют для изучения реакций синтеза и физико-химических превращений материалов разной природы при нагревании. Известны работы, посвященные изучению процесса деструкции гибких и жестких пенополиуретанов методом совмещения ТГА и Фурье ИК-спектроскопии летучих продуктов пиролиза [17, 18]. Фурье ИК-спектроскопия использована для анализа образования силикагелей в процессе протекания реакций гидролиза и поликонденсации алкоксидов кремния и этилсиликата [14, 15]. По соотношению

интенсивности характеристических полос поглощения в ИК-спектрах ОНМ можно судить о степени гидролиза прекурсора неорганического каркаса и конденсации силанольных групп в процессе получения материала, а также последующих его трансформациях.

На рис. 1 и 2 показаны ИК-Фурье спектры исходных образцов гибридной ПУ-неорганической теплоизоляции после преобразования Кубелка – Мунка.

Рассмотрим по отдельности структурные особенности двух образцов. Типичным способом получения полиуретановых полимерных материалов является реакция взаимодействия изоцианатных групп с гидроксильными группами у используемых реагентов.

Анализ ИК-спектра первого образца (см. рис. 1) дает основание считать, что при получении гибридного вспененного материала все изоцианатные группы прекурсора были исчерпаны: в спектре отсутствуют полосы валентных асимметричных и симметричных колебаний изоцианатных групп

$\text{N}=\text{C}=\text{O}$ при 2270 и 1350 см^{-1} соответственно. Наличие же полос поглощения валентных колебаний NH групп при 3250 см^{-1} и колебаний группы $\nu_s \text{C}=\text{O}$ в уретановой при 1732 см^{-1} подтверждает образование уретановых фрагментов $-\text{NHCO}-$ в гибридной пене. В спектре отсутствуют обычно очень интенсивные полосы валентных $=\text{C}-\text{H}$ связей при 3030 см^{-1} и средней интенсивности полосы плоскостных колебаний $\text{C}=\text{C}$ в области 1600 см^{-1} , характерные для ароматических колец. Можно предположить, что полиизоцианат, взятый для получения гибридного ОНМ, относится к группе Desmodur алифатического типа [18]. В пользу этого вывода служат также полосы валентных колебаний νCH_2 групп при 2925 и 2855 см^{-1} и соответствующая им полоса деформационных колебаний δCH_2 при 1446 см^{-1} . На нее могут накладываться колебания δNH групп. Полоса поглощения при 2966 см^{-1} отнесена к колебаниям $\nu_{as} \text{Si}-\text{CH}_3$ групп на поверхности SiO_2 каркаса (появляется в результате приме-

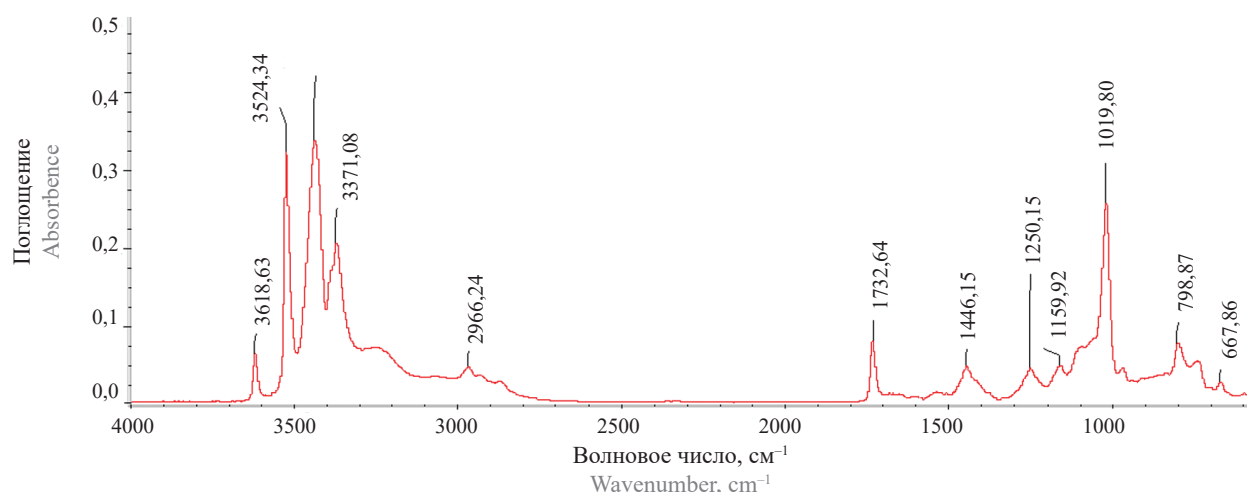


Рис. 1. ИК-Фурье спектр образца гибридной органо-неорганической теплоизоляции ($\rho = 59,2\text{ кг/м}^3$)

Fig. 1. IR Fourier spectrum of a hybrid organo-inorganic thermal insulation sample ($\rho = 59.2\text{ kg/m}^3$)

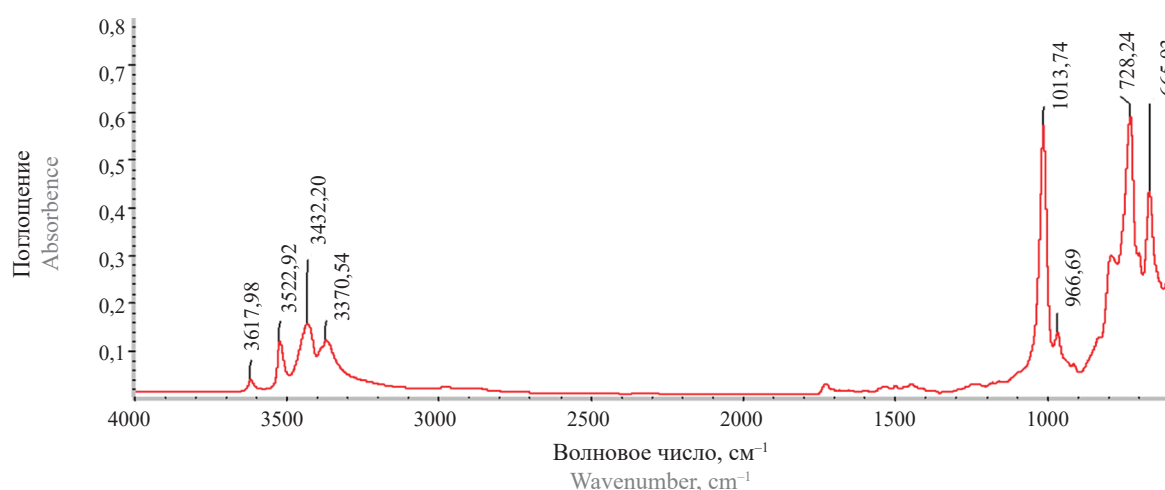


Рис. 2. ИК-Фурье спектр образца гибридной органо-неорганической теплоизоляции ($\rho = 69,2\text{ кг/м}^3$)

Fig. 2. IR Fourier spectrum of a hybrid organo-inorganic thermal insulation sample ($\rho = 69.2\text{ kg/m}^3$)

ния метилтриметоксисилана, например, в качестве прекурсора в синтезе силикааэрогеля). Обращают на себя внимание интенсивные полосы поглощения в области $3300\text{--}3700\text{ см}^{-1}$, характеристичные для валентных колебаний OH и NH групп.

По данным [16], в ИК-спектрах всех силикагелей, полученных разными способами, присутствуют три основные полосы колебаний Si–OH групп: при 3750 , 3650 и 3520 см^{-1} . В спектре образца исследуемого ОНМ отсутствует полоса валентных колебаний при 3750 см^{-1} , которая характеристична для изолированных Si–OH групп на поверхности силикагелей, а также соответствующая ей полоса деформационных колебаний при 870 см^{-1} [16]. Это может служить косвенным указанием на участие изолированных силанольных групп неорганического каркаса в образовании химических связей с изоцианатными группами прекурсора.

Интересно, что при разработке теплоизоляционного ОНМ для контейнеров с сжиженным природным газом наличие полосы валентных колебаний при 3750 см^{-1} в ИК-спектре вспененного материала на основе ППУ и силикааэрогеля использовано в качестве доказательства образования гибридного композита по типу взаимопроникающих сеток со слабыми физическими связями взаимодействия [19].

В спектре гибридной теплоизоляции присутствуют полосы при 3618 , 3524 и 3436 см^{-1} . Они характеристичны для колебаний разных типов свободных силанольных групп в структуре силикааэрогелей (группы на поверхности, в объеме матрицы) и в водородсвязанной форме. Интенсивность полос Si–OH зависит от степени дегидратации геля [16]. Наличие указанных полос поглощения в ИК-спектре гибридной теплоизоляции можно объяснить тем, что силанольные группы оказались либо не востребованными из-за недостатка алифатического диизоцианата типа Desmodur 3200, либо недоступными для взаимодействия с $\text{N}=\text{C}=\text{O}$ изоцианатными группами в процессе получения материала. Установлено, например, что лишь половина поверхностных силанольных групп в силикааэрогеле участвует в реакции модификации [20]. Пространственные затруднения препятствовали прямому взаимодействию ароматического диизоцианата с поверхностными Si–OH группами силоксанового каркаса [4]. Для получения ПУ гибридного ОНМ пришлось предварительно провести реакцию конденсации Si–OH групп силикааэрогеля с полиэфирполиолом и лишь затем с ароматическим диизоцианатом [4].

Следует отметить, что в ИК-спектре гибридной теплоизоляции на полосу 3436 см^{-1} могут накладываться колебания ν_s NH групп в ПУ фрагментах. Ассиметричным валентным колебаниям ν_{as} NH

групп в водородсвязанной форме отвечает полоса поглощения при 3371 см^{-1} .

Большой интерес представляет ИК-область спектра в интервале частот $1800\text{--}500\text{ см}^{-1}$, относящаяся к валентным и деформационным колебаниям разных групп в структуре гибридного ОНМ.

Интенсивная полоса при 1020 см^{-1} и «плечо» при $\sim 1100\text{ см}^{-1}$ характеризуют колебания ν_s Si–O– и ν_{as} Si–O– связей в остоле Si–O–Si неорганического каркаса. Соотношение интенсивностей этих полос зависит от степени сшивания Si–O–Si сетки. Полоса низкочастотная наблюдается в слабосшитых образцах. Высокочастотная полоса $\sim 1100\text{ см}^{-1}$ указывает на сильно сшитый каркас [15]. Следует учитывать, что в этой области спектра находятся также колебания ν_s C–O–C групп в ППУ при 1092 см^{-1} [17]. Однако ассиметричным валентным колебаниям полиэфирных связей соответствуют более высокочастотные колебания ν_{as} C–O–C при 1223 см^{-1} . Таким образом можно уверенно различить группировки в структуре исследуемого материала. Полоса при 1160 см^{-1} скорее всего связана с колебаниями Si–O–Si групп в тетраэдрах остола каркаса [14]. В исходном образце эта полоса средней интенсивности отражает также колебания связи C–O в Si–O–C группах [16], которые возникают в результате реакции между изоцианатными и силанольными группами при синтезе ОНМ.

В области ИК-спектра $1000\text{--}500\text{ см}^{-1}$ исходного образца выявлен ряд полос средней и слабой интенсивности. Полосы поглощения при 975 и 799 см^{-1} соответствуют валентным колебаниям Si–O(H) связей в разного типа силанольных группах [16]. Полоса при $\sim 740\text{ см}^{-1}$ обусловлена маятниковыми колебаниями $-\text{CH}_2-$ групп в ПУ структурных фрагментах. Наконец, полосы при 668 и $\sim 600\text{ см}^{-1}$ отвечают колебаниям Si–O–Si групп в неорганическом каркасе.

Фурье ИК-спектр второго образца (рис. 2) отличается от первого значительно меньшей интенсивностью полос, характеристичных для колебаний связей фрагментов ПУ, при практически одинаковом содержании органики в ОНМ ($57,7$ и $57,3\%$ соответственно [11]). Как и у первого образца, в его ИК-спектре отсутствуют полосы валентных и деформационных колебаний свободных изоцианатных групп и проявляется полоса ν_s 1731 см^{-1} , характеристичная для уретановых групп. При этом наблюдается снижение интенсивности полос, обусловленных валентными колебаниями силанольных групп в разных формах, в области $3800\text{--}3200\text{ см}^{-1}$. Данные факты являются указанием на образование более часто сшитой структуры гибридного ОНМ. Именно повышенная плотность сшивки ПУ с неорганическим каркасом у второго образца ОНМ влияет на снижение молекулярной подвижности отдельных связей и фрагментов в ПУ доменах, что неизбежно отра-

жается на интенсивности всех полос в ИК-спектре [21]. Другим важным фактом является отсутствие в ИК-спектре второго образца полос, обусловленных валентными и деформационными колебаниями ароматических бензольных колец. В совокупности все это дает основание полагать, что в качестве органического прекурсора при получении гибридного ОНМ использован алифатический трехфункциональный полиизоцианат из группы Desmodur, возможно типа Desmodur 3300 [22]. Сравнительный анализ ИК-спектров двух образцов гибридной ПУ теплоизоляции в области 1200–500 см^{-1} показывает, что у второго образца интенсивность полосы симметричных валентных колебаний Si–O связей (ν_s , 1013 см^{-1}), а также соотношение полос ν_s 1013/ ν_{as} 1097 в SiO_2 каркасе являются более высокими. Таким образом, можно сделать вывод, что у второго образца гибридного ОНМ неорганический каркас имеет более «рыхлую» структуру.

При всех скоростях нагревания в азоте от 200 до 500 °C у первого образца наблюдается три стадии разложения, а у второго — только две. И в том и другом случае все стадии являются эндотермическими, идут с поглощением тепла. Особенно значителен тепловой эффект на первой стадии. Так, при скорости нагрева 10 °C/мин тепловой эффект при пиролизе первого образца гибридной теплоизоляции на стадии в интервале 247–321 °C ($T_{\text{макс}} = 283$ °C) составляет 512,1 Дж/г, а на второй и третьей в интервале 323–373 °C ($T_{\text{макс}} = 342$ °C) и 373–425 °C ($T_{\text{макс}} = 399$ °C) — 8,24 и 27,33 Дж/г соответственно. Теплота реакции пиролиза второго образца в интервале температур 246–329 °C ($T_{\text{макс}} = 283$ °C) равна 683,4 Дж/г, а на стадии в интервале 329–430 °C ($T_{\text{макс}} = 391$ °C) составляет 32,3 Дж/г. Полученные результаты указывают на преобладание энергетических затрат на разрыв химических связей между ПУ доменами и неорганическим каркасом и испарение образующихся летучих продуктов над тепловыделением вследствие реакций образования новых связей, структурных трансформаций.

Образцы для выяснения физико-химических процессов, протекающих при пиролизе ОНМ, получали при скорости нагрева 20 °C/мин. Реперными температурными точками отбора образцов для Фурье ИКС анализа служили пиковые значения ДТГ кривых на разных стадиях пиролиза. В случае первой гибридной теплоизоляции с $\rho = 59,2 \text{ кг/м}^3$ такими точками были температуры 298, 352 и 416 °C (рис. 3). У второго образца теплоизоляции — 304 и 405 °C соответственно (рис. 4).

Как следует из рис. 3, образец теряет на первой стадии в интервале 200–325 °C около 23 % своей массы при пиковой скорости 9,65 %/мин. Вторая

стадия продолжается до 388 °C. Потеря массы составляет почти 35 %, а значение максимальной скорости потери массы — 8,43 %/мин. Наконец, на 3-й стадии до 450 °C образец теряет 9,9 % массы при пиковой скорости 5,18 %/мин.

В случае второго образца гибридного ОНМ на первой стадии потери массы в интервале 200–350 °C составляют 26,6 % при максимальной скорости потери массы 10,4 %/мин, а на второй стадии в интервале 350–467 °C — 22,2 % и 7,07 %/мин соответственно (рис. 4).

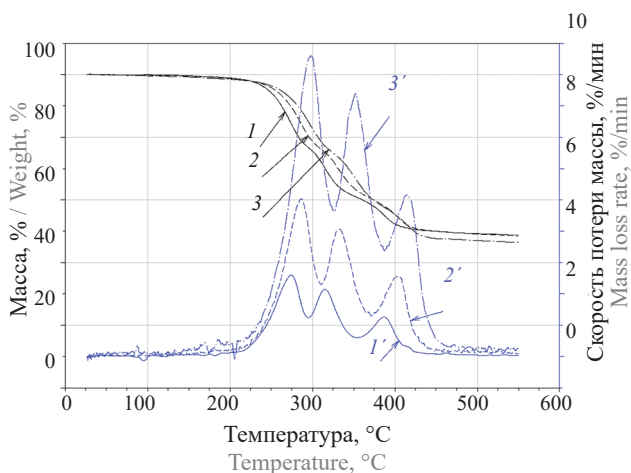


Рис. 3. ТГ (1, 2, 3) и ДТГ (1', 2', 3') кривые пиролиза первого образца ($\rho = 59,2 \text{ кг/м}^3$) гибридной ПУ неорганической теплоизоляции в азоте при различных скоростях нагревания: 1, 1' — 5 °C/мин; 2, 2' — 10 °C/мин; 3, 3' — 20 °C/мин

Fig. 3. TG (1, 2, 3) and DTG (1', 2', 3') pyrolysis curves of the first sample ($\rho = 59.2 \text{ kg/m}^3$) of hybrid organo-inorganic thermal insulation in nitrogen at different heating rates: 1, 1' — 5 °C/min; 2, 2' — 10 °C/min; 3, 3' — 20 °C/min

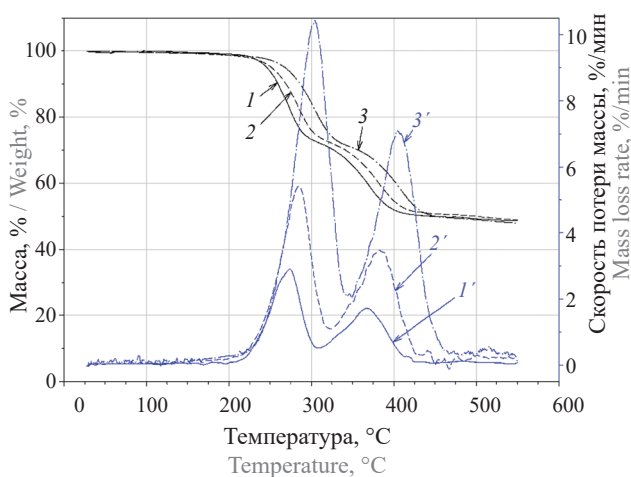


Рис. 4. ТГ (1, 2, 3) и ДТГ (1', 2', 3') кривые пиролиза второго образца ($\rho = 69,2 \text{ кг/м}^3$) гибридной органо-неорганической теплоизоляции в азоте при различных скоростях нагревания: 1, 1' — 5 °C/мин; 2, 2' — 10 °C/мин; 3, 3' — 20 °C/мин

Fig. 4. TG (1, 2, 3) and DTG (1', 2', 3') pyrolysis curves of the second sample ($\rho = 69.2 \text{ kg/m}^3$) of hybrid organo-inorganic thermal insulation in nitrogen at different heating rates: 1, 1' — 5 °C/min; 2, 2' — 10 °C/min; 3, 3' — 20 °C/min

Анализ изменений в ИК-спектрах образцов гибридной теплоизоляции позволяет выяснить характер физико-химических процессов, протекающих при пиролизе. Уже на начальной стадии пиролиза первого образца при 298 °С в ИК-спектре в области 4000–2500 см⁻¹ наблюдается практически полное исчезновение полос валентных колебаний силанольных групп. Интенсивность самой сильной полосы при 3436 см⁻¹ падает с 0,347 до 0,048. При этом сохраняются полосы в области 2966–2825 см⁻¹. Их интенсивность слегка снижается, а положение незначительно смещается в сторону более высоких частот. В два раза уменьшается интенсивность полосы при 1732 см⁻¹. Наблюдаемые изменения в этой области ИК-спектра однозначно указывают на участие Si–ОН групп неорганического каркаса в меж- и внутримолекулярных реакциях конденсации с выделением воды, частичный разрыв связей органики с каркасом. Подтверждением вывода служат также изменения в области 2000–500 см⁻¹. В частности, наблюдается рост полосы при ~1100 см⁻¹ (ν_{as} Si–O–Si колебаний в тетраэдрах (SiO)₄ каркаса) по отношению к полосе колебаний ν_s Si–O–Si групп при ~1015 см⁻¹ (в участках каркаса с цепным и ленточным типом связей).

На второй стадии пиролиза продолжается снижение интенсивности полос колебаний уретановых групп из-за разрыва связей с каркасом. Начинается активное разрушение органики, ее карбонизация. Слабая, широкая полоса колебаний C=C связей при 1646 см⁻¹ отражает образование ароматических фрагментов в структуре карбонизата. При этом происходит далее процесс уплотнения Si–O–Si скелета (в ИК-спектре доминирует полоса при 1107 см⁻¹). Наблюдаемые изменения в ИК-спектрах согласуются с установленной усадкой этого образца теплоизоляции в интервале 300–400 °С [11].

При прогреве образца до 416 °С в ИК-спектре полностью исчезает полоса колебаний уретановых связей, остаются полосы в области 1300–500 см⁻¹, характеристичные для различных колебаний Si–O–Si связей в остове неорганического каркаса, в основном типичные для тетраэдров (SiO)₄.

Другой характер физико-химических превращений наблюдается при пиролизе второго образца гибридной ПУ теплоизоляции. Из-за более плотной сшивки уретановых фрагментов с неорганическим каркасом не сразу происходит разрыв всех химических связей ПУ с силикааэрогелем. Частичный разрыв приводит к образованию «бахромы» в сетчатой ПУ структуре и образованию свободных Si–ОН. За счет реакции освободившихся изоцианатных групп «бахромы» возникают более прочные мочевиновые связи в ПУ сетке (проявляется полоса при 1635 см⁻¹). Это помогает сохранять стабильность механических

свойств ОНМ. На первой стадии наблюдается снижение интенсивности всех полос валентных колебаний Si–ОН групп в области 3700–3000 см⁻¹ из-за реакции конденсации с выделением воды. Полосы валентных колебаний поверхностных Si–ОН групп в ИК-спектре образца полностью исчезают на второй стадии пиролиза ОНМ. При этом полностью исчезают и полосы валентных колебаний уретановых связей. Таким образом происходит активное разрушение органики, наблюдается структурная трансформация силикааэрогеля, приближающаяся к структуре пирогенного диоксида кремния. Изменения в Фурье ИК-спектрах нелетучих остатков пиролиза второго образца гибридной теплоизоляции позволяют понять причину его усадки при нагревании выше 400 °С [9].

Определение макрокинетических параметров пиролиза образцов гибридной ПУ — неорганической теплоизоляции на каждой стадии процесса основано на применении уравнения Аррениуса:

$$d\alpha/dT = (A/\beta)\exp(-E_{\text{эфф}}/RT)f(\alpha),$$

где α — степень превращения, К;

A — предэкспоненциальный множитель;

β — скорость нагрева, град/мин;

$E_{\text{эфф}}$ — эффективная энергия активации;

$f(\alpha)$ — функция, определяющая механизм разложения.

$$\alpha = (m_0 - m_t)/(m_0 - m_k),$$

где m_0 , m_t , m_k — масса образца начальная, текущая, в конце каждой стадии. Значение E определяли по углу наклона прямых, полученных при разных скоростях нагрева по Киссинджеру в координатах $\ln(\beta/T_{\text{max}}^2) — 1/T_{\text{max}}$. Для установления механизма и интегрированной функции разложения $g(\alpha)$, как и ранее [11, 13], применяли метод гауссиан для выделения стадий, анализ кривых ДТГ и ТГ по Криадо (Criado), табулированные значения приведенной скорости разложения при $\alpha = 0,75$ для каждой стадии. Результаты анализа приведены в таблице. Период ниже 200 °С, связанный с испарением сорбированной влаги, не рассматривается. Представлены анализируемые температурные интервалы стадий. В скобках показан характер смещения температуры окончания ДТГ пика каждой стадии при увеличении скорости нагрева от 5 до 20 град/мин.

Установлено, что пиролиз обоих образцов ОНМ на всех стадиях осуществляется по механизму нуклеации, зарождению и росту ядер (активных центров разложения ПУ) по закону случая и реакции первого порядка R (1). Результаты исследования изменений в Фурье ИК-спектрах первого образца при нагревании показывают, что на первой стадии идет преиму-

Параметры макрокинетики и механизм пиролиза образцов гибридной органико-неорганической теплоизоляции
Macrokinetic parameters and mechanism of pyrolysis of samples of hybrid organic-inorganic thermal insulation

Образец Sample	Стадия, интервал температуры, °C Stage, temperature interval, °C	$E_{эфф}$, кДж/моль E_a , kJ/mol	$\lg(A)$, мин ⁻¹ $\lg(A)$, min ⁻¹	Механизм $g(\alpha)$ Mechanism $g(\alpha)$
Первый ($\rho = 59,2$ кг/м ³) First ($\rho = 59.2$ kg/m ³)	1; 200–(295–325°) 2; 325–(355–387°) 3; 387–(420–450°)	147,1 107,3 182,9	13,52 8,86 13,84	$R(1), g(\alpha) = -[\ln(1-\alpha)]^n$
Второй ($\rho = 69,2$ кг/м ³) Second ($\rho = 69.2$ kg/m ³)	1; 200–(308–346°) 2; 346–(405–450°)	101,2 128,2	9,10 9,77	$R(1), g(\alpha) = -[\ln(1-\alpha)]^n$

существенно преобразование неорганического каркаса ОНМ за счет конденсации поверхностных свободных силанольных групп аэрогеля. Этот вывод согласуется с фактом совпадения температурного интервала первой стадии разложения образца и значений эффективной энергии активации процесса независимо от атмосферной среды [11]. Вторая стадия пиролиза связана с активным разложением органики алифатической природы и поэтому имеет низкие значения $E_{эфф}$. На 3-й стадии формируется обуглероженный продукт, и идет его разложение с высокой эффективной энергией активации.

По своему поведению при нагреве в инертной среде второй образец ОНМ существенно отличается от первого. По-видимому, из-за образования частой пространственно-сшитой ПУ структуры возникают напряженные связи в ОНМ, облегчающие разрыв химических связей органики с неорганикой. Это прежде всего сказывается на снижении значения $E_{эфф}$ на первой стадии пиролиза образца гибридной теплоизоляции. Последующий процесс активного разложения ПУ составляющей замедлен, приводит к низкому выходу карбонизованного продукта, упрочняющего структуру силикааэрогеля и препятствующего его усадке [11].

Выводы

В работе исследованы структурные особенности двух образцов гибридной полиуретано-

неорганической теплоизоляции и прослежены физико-химические процессы, протекающие при их нагревании в динамических условиях в атмосфере азота до 750 °C с применением термогравиметрического метода и Фурье ИК-спектроскопии.

Показан многостадийный характер пиролиза обоих образцов гибридного теплоизоляционного материала. Пиролиз первого образца ($\rho = 59,2$ кг/м³) является трехстадийным процессом. У второго образца ($\rho = 69,2$ кг/м³) разложение протекает в две стадии. Все стадии являются эндотермичными. Это указывает на преобладание энергетических затрат на разрыв связей между органической и неорганической частями, на испарение воды, образующейся в результате конденсации силанольных групп силикааэрогеля, на выделение продуктов пиролиза органики над общим тепловыделением за счет реакций образования новых связей и новых продуктов.

Определены механизм и параметры макрокинетики основных стадий пиролиза образцов гибридной теплоизоляции. Установлено, что пиролиз образцов ОНМ на всех стадиях осуществляется по механизму нуклеации и росту ядер (активных центров деструкции) по закону случая $R(1)$.

Анализ Фурье ИК-спектров образцов гибридных ОНМ показал, что оба образца изготовлены с применением изоцианатов алифатического типа Desmodur.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Помогайло А.Л. Гибридные полимер-неорганические нанокомпозиты // Успехи химии. 2000. Т. 69. № 1. С. 69–89. DOI: 10.1070/RC2000v069n01ABEH000506
2. Sanchez C., Shea K.J., Kitagawa S. Recent progress in hybrid materials science // Chemical Society Reviews. 2011. Vol. 40. Issue 2. Pp. 471–472. DOI: 10.1039/C1CS90001C
3. Figueira R.B. Hybrid sol-gel coatings for corrosion mitigation: A critical review // Polymers. 2020. Vol. 12. Issue 2. P. 689. DOI: 10.3390/polym12030689
4. Verdolotti L., Lavorgna M., Lamanna R., Di Maio E., Iannace S. Polyurethane-silica hybrid foam by sol-gel approach: Chemical and functional properties // Polymer. 2015. Vol. 56. Pp. 20–28. DOI: 10.1016/j.polymer.2014.10.017
5. Maleki H., Duraes L., Portugal A. An overview on silica aerogels synthesis and different mechanical reinforcing strategies // Journal of Non-Crystalline Solids. 2014. Vol. 385. Pp. 55–74. DOI: 10.1016/j.jnoncrsol.2013.10.017

6. Guo H., Meador M.A.B., McCorkle L., Quade D.J., Guo J., Hamilton B. Polyimide aerogels cross-linked through amine functionalized poly-oligomeric silsesquioxane // *ACS Applied Materials*. 2011. Vol. 3. Issue 2. Pp. 546–552. DOI: 10.1021/am101123h
7. Mandal C., Donthula S., Far H.M., Saeed A.M., Sotiriou-Leventis C., Leventis N. Transparent, mechanically strong, thermally insulating cross-linked silica aerogels for energy-efficient windows // *Journal of Sol-Gel Science and Technology*. 2019. Vol. 92. Issue. 2. Pp. 84–100. DOI: 10.1007/s10971-019-05100-5
8. Katti A., Shimpi N., Roy S., Lu H., Fabrizio E.F., Dass A. Chemical, Physical and mechanical characterization of isocyanate cross-linked amino-modified silica aerogels // *Chemistry and Materials*. 2006. Vol. 18. Issue 2. Pp. 285–296. DOI: 10.1021/cm0513841
9. Demilecamps A., Alves M., Rigacci A., Reichenauer G., Budtova T. Nanostructured interpenetrated organic-inorganic aerogels with superinsulating properties // *Journal of Non-Crystalline Solids*. 2016. Vol. 452. Pp. 259–265. DOI: 10.1016/j.jnoncrysol.2016.09.003
10. Meador A.B., Capadona L.A., McCorkle L., Papadopoulos D.S., Leventis N. Structure–property relationships in porous 3D nanostructures as a function of preparation conditions: Isocyanate cross-linked silica aerogels // *Chemistry of Materials*. 2007. Vol. 19. Issue 9. Pp. 2247–2260. DOI: 10.1021/cm070102p
11. Кобелев А.А., Круглов Е.Ю., Асеева Р.М., Серков Б.Б. Гибридная полиуретано-неорганическая теплоизоляция: пожарная опасность и термоокислительное разложение // *Все материалы. Энциклопедический справочник*. 2021. № 8. С. 24–33. DOI: 10.31044/1994-6260-2021-0-8-24-33
12. Кобелев А.А., Круглов Е.Ю., Нагановский Ю.К., Асеева Р.М. Физико-химические превращения гибридной полиуретано-неорганической теплоизоляции при нагревании на воздухе и в инертной атмосфере // *Пожары и чрезвычайные ситуации: предотвращение, ликвидация*. 2021. № 4. С. 22–29. DOI: 10.25257/FE.2021.4.22-29 URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=47501844>
13. Кобелев А.А., Круглов Е.Ю., Нагановский Ю.К., Асеева Р.М., Серков Б.Б. Термоокислительная деструкция пенополиизоциануратной теплоизоляции // *Все материалы. Энциклопедический справочник*. 2018. № 12. С. 31–40. DOI: 10.31044/1994-6260-2018-0-12-31-39
14. Wang S., Wang D., Smart S., Diniz da Costa J.C. Ternary phase-separation investigation of sol-gel derived silica from ethyl silicate 40 // *Scientific Reports*. 2015. Vol. 5. Issue 1. P. 14560. DOI: 10.1038/srep14560
15. Niznansky D., Rehspringer J.L. Infrared study of SiO₂ sol to gel evolution and gel aging // *Journal of Non-Crystalline Solids*. 1995. Vol. 180. Issue 2–3. Pp. 191–196. DOI: 10.1016/0022-3093(94)00484-6
16. Чукин Г.Д. Химия поверхности и строение дисперсного кремнезема. М. : Паладин, 2008. 172 с.
17. Garrido M.A., Font R. Pyrolysis and combustion study of flexible polyurethane foam // *Journal of Analytical and Applied Pyrolysis*. 2015. Vol. 113. Pp. 202–215. DOI: 10.1016/j.jaap.2014.12.017
18. Lingling J., Huahua X., Qingsong W., Jinhua S. Thermal degradation characteristics of rigid polyurethane foam and the volatile products analysis with TG-FT-IR-MS // *Polymer Degradation and Stability*. 2013. Vol. 98. Issue 12. Pp. 2687–2696. DOI: 10.1016/j.polyimdegstab.2013.09.032
19. Kim Jeong-Hyeon, Ahn Jae-Hyeok, Kim Jeong-Dae, Lee Dong-Ha, Kim Seul-Kee, Lee Jae-Myung. Influence of silica-aerogel on mechanical characteristics of polyurethane based composites: Thermal conductivity and strength // *Materials*. 2021. Vol. 14. Issue 7. P. 1790. DOI: 10.3390/ma14071790
20. Ballard C.C., Broge E.C., Iler R.K., John D.S.St., McWhorter J.R. Esterification of the surface of amorphous silica // *The Journal of Physical Chemistry*. 1961. Vol. 65. Issue 1. Pp. 20–25. DOI: 10.1021/j100819a007
21. Бартенев Г.М., Бартенева А.Г. Релаксационные свойства полимеров. М. : Химия, 1992. 384 с.
22. Алифатические полиизоцианаты DESMODUR® // *Промышленные покрытия*. 2019. URL: <https://www.lkmportal.com/articles/alifaticheskie-poliizocianaty-desmodurr>

REFERENCES

1. Pomogailo A.D. Hybrid polymer-inorganic nanocomposites. *Uspekhi khimii/Russian Chemical Reviews*. 2000; 69(1):53-80. DOI: 10.1070/RC2000v-069n01ABEH000506 (rus.).
2. Sanchez C., Shea K.J., Kitagawa S. Recent progress in hybrid materials science. *Chemical Society Reviews*. 2011; 40(2):471-472. DOI: 10.1039/C1CS90001C
3. Figueira R.B. Hybrid sol-gel coatings for corrosion mitigation: A critical review. *Polymers*. 2020; 12(2):689. DOI: 10.3390/polym12030689
4. Verdolotti L., Lavorgna M., Lamanna R., Di Maio E., Iannace S. Polyurethane-silica hybrid foam by sol-gel approach: Chemical and functional properties. *Polymer*. 2015; 56:20-28. DOI: 10.1016/j.polymer.2014.10.017
5. Maleki H., Duraes L., Portugal A. An overview on silica aerogels synthesis and different mechanical reinforcing strategies. *Journal of Non-Crystalline Solids*. 2014; 385:55-74. DOI: 10.1016/j.jnoncrysol.2013.10.017
6. Guo H., Meador M.A.B., McCorkle L., Quade D.J., Guo J., Hamilton B. Polyimide aerogels cross-linked

- through amine functionalized poly-oligomeric silsesquioxane. *ACS Applied Materials*. 2011; 3(2):546-552. DOI: 10.1021/am101123h
7. Mandal C., Donthula S., Far H.M., Saeed A.M., Sotiriou-Leventis C., Leventis N. Transparent, mechanically strong, thermally insulating cross-linked silica aerogels for energy-efficient windows. *Journal of Sol-Gel Science and Technology*. 2019; 92(2): 84-100. DOI: 10.1007/s10971-019-05100-5
 8. Katti A., Shimpi N., Roy S., Lu H., Fabrizio E.F., Dass A. Chemical, physical and mechanical characterization of isocyanate cross-linked amino-modified silica aerogels. *Chemistry and Materials*. 2006; 18(2):285-296. DOI: 10.1021/cm0513841
 9. Demilecamps A., Alves M., Rigacci A., Reichenauer G., Budtova T. Nanostructured interpenetrated organic-inorganic aerogels with super insulating properties. *Journal of Non-Crystalline Solids*. 2016; 452:259-265. DOI: 10.1016/j.jnoncrysol.2016.09.003
 10. Meador A.B., Capadona L.A., McCorkle L., Papadopoulos D.S., Leventis N. Structure-properties relationships in porous 3D nanostructures as a function of preparation conditions. Isocyanate cross-linked silica aerogels. *Chemistry of Materials*. 2007; 19(9):2247-2260. DOI: 10.1021/cm070102p
 11. Kobelev A.A., Kruglov E.Yu., Aseeva R.M., Serkov B.B. Hybrid polyurethane-inorganic thermal-insulation: fire hazard and thermo-oxidative decomposition. *Vse Materialy. Entsiklopedicheskii Spravochnik*. 2021; 8:24-33. DOI: 10.31044/1994-6260-2021-0-8-24-33 (rus.).
 12. Kobelev A.A., Kruglov E.Yu., Naganovskii Yu.K., Aseeva R.M. Physicochemical changes of hybrid polyurethane inorganic thermal insulation when heated in air and in an inert atmosphere. *Fire and emergencies: prevention, elimination*. 2021; 4:22-29. DOI: 10.25257/FE.2021.4.22-29 URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=47501844> (rus.).
 13. Kobelev A.A., Kruglov E.Yu., Naganovskii Yu.K., Aseeva R.M., Serkov B.B. Thermal-oxidative destruction of polyisocyanurate heat insulation. *Vse Materialy. Entsiklopedicheskii Spravochnik*. 2018; 12:31-40. DOI: 10.31044/1994-6260-2018-0-12-31-39 (rus.).
 14. Wang S., Wang D., Smart S., Diniz da Costa J.C. Ternary phase-separation investigation of sol-gel derived silica from ethyl silicate 40. *Scientific Reports*. 2015; 5(1):14560. DOI: 10.1038/srep14560
 15. Niznansky D., Rehspringer J.L. Infrared study of SiO₂ sol to gel evolution and gel aging. *Journal of Non-Crystalline Solids*. 1995; 180(2-3):191-196. DOI: 10.1016/0022-3093(94)00484-6
 16. Chukin G.D. *Surface chemistry and structure of dispersed silica*. Moscow, Paladin Publ., 2008; 172. (rus.).
 17. Garrido M.A., Font R. Pyrolysis and combustion study of flexible polyurethane foam. *Journal of Analytical and Applied Pyrolysis*. 2015; 113:202-215. DOI: 10.1016/j.jaap.2014.12.017
 18. Lingling J., Huahua X., Qingsong W., Jinhua S. Thermal degradation characteristics of rigid polyurethane foam and the volatile products analysis with TG-FTIR-MS. *Polymer Degradation and Stability*. 2013; 98(12):2687-2696. DOI: 10.1016/j.polymdegradstab.2013.09.032
 19. Kim Jeong-Hyeon, Ahn Jae-Hyeok, Kim Jeong-Dae, Lee Dong-Ha, Kim Seul-Kee, Lee Jae-Myung. Influence of silica-aerogel on mechanical characteristics of polyurethane based composites: Thermal conductivity and strength. *Materials*. 2021; 14:1790. DOI: 10.3390/ma14071790
 20. Ballard C.C., Broge E.C., Iler R.K., John D.S.St., McWhorter J.R. Esterification of the surface of amorphous silica. *The Journal of Physical Chemistry*. 1961; 65(1):20-25. DOI: 10.1021/j100819a007
 21. Bartenev G.M., Barteneva A.G. *Relaxation properties of polymers*. Moscow, Khimiya Publ., 1992; 384.
 22. Aliphatic polyisocyanates DESMODUR®. *Industrial Coatings*. 2019. URL: <https://www.lkmportal.com/articles/alifaticheskie-poliizocianaty-desmodurr> (rus.).

Поступила 21.04.2022, после доработки 22.06.2022;

принята к публикации 11.07.2022

Received April 21, 2022; Received in revised form June 22, 2022;

Accepted July 11, 2022

Информация об авторах

КОБЕЛЕВ Артем Александрович, канд. техн. наук, преподаватель кафедры пожарной безопасности в строительстве в составе Учебно-научного комплекса пожарной безопасности объектов защиты, Академия Государственной противопожарной службы Министерства Российской Федерации по делам гражданской обороны, чрезвычайным ситуациям и ликвидации последствий стихийных бедствий, Россия, 129366, г. Москва, ул. Бориса Галушкина, 4; SPIN-код: 6556-5380; ORCID: 0000-0003-2957-8685; e-mail: artemkobelev@gmail.com

Information about the authors

Artem A. KOBELLEV, Cand. Sci. (Eng., Lecturer, Educational-Scientific Complex of Fire Safety of Protected Objects, the State Fire Academy of the Ministry of Russian Federation for Civil Defense, Emergencies and Elimination on Consequences of Natural Disasters, Borisa Galushkina St., 4, Moscow, 129366, Russian Federation; SPIN-code: 6556-5380; ORCID: 0000-0003-2957-8685; e-mail: artemkobelev@gmail.com

НАГАНОВСКИЙ Юрий Кузьмич, канд. техн. наук, ведущий научный сотрудник, Всероссийский ордена «Знак Почета» научно-исследовательский институт противопожарной обороны Министерства Российской Федерации по делам гражданской обороны, чрезвычайным ситуациям и ликвидации последствий стихийных бедствий, Россия, 143903, Московская обл., г. Балашиха, мкр. ВНИИПО, 12; ORCID: 0000-0001-9739-9123; e-mail: reut11731@mail.ru

КРУГЛОВ Евгений Юрьевич, старший научный сотрудник Учебно-научного комплекса пожарной безопасности объектов защиты, Академия Государственной противопожарной службы Министерства Российской Федерации по делам гражданской обороны, чрезвычайным ситуациям и ликвидации последствий стихийных бедствий, Россия, 129366, г. Москва, ул. Бориса Галушкина, 4; ORCID: 0000-0003-3684-5083; e-mail: 89268196698@mail.ru

АСЕЕВА Роза Михайловна, д-р хим. наук, профессор кафедры пожарной безопасности в строительстве в составе Учебно-научного комплекса пожарной безопасности объектов защиты, Академия Государственной противопожарной службы Министерства Российской Федерации по делам гражданской обороны, чрезвычайным ситуациям и ликвидации последствий стихийных бедствий, Россия, 129366, г. Москва, ул. Бориса Галушкина, 4; ORCID: 0000-0002-2940-9155; e-mail: rm-aseeva@yandex.ru

ШАПИХОВ Еркебулан Маратович, адъюнкт кафедры пожарной безопасности в строительстве в составе Учебно-научного комплекса пожарной безопасности объектов защиты, Академия Государственной противопожарной службы Министерства Российской Федерации по делам гражданской обороны, чрезвычайным ситуациям и ликвидации последствий стихийных бедствий, Россия, 129366, г. Москва, ул. Бориса Галушкина, 4; SPIN-код: 1845-7586; ORCID: 0000-0003-4902-126X; e-mail: erkebulan.shapikhov@mail.ru

Вклад авторов:

Кобелев А.А. — концепция исследования; написание введения, заключения; доработка текста; работа с редакцией.

Нагановский Ю.К. — развитие методологии эксперимента; проведение эксперимента.

Круглов Е.Ю. — предоставление материалов для исследования.

Асеева Р.М. — научное руководство; анализ результатов экспериментов.

Шапихов Е.М. — обработка эксперимента; подготовка графической части.

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Yuriy K. NAGANOVSKIY, Cand. Sci. (Eng.), Leading Researcher, All-Russian Research Institute for Fire Protection of Ministry of Russian Federation for Civil Defense, Emergencies and Elimination of Consequences of Natural Disasters, VNIPO, 12, Balashikha, Moscow Region, 143903, Russian Federation; ORCID: 0000-0001-9739-9123; e-mail: reut11731@mail.ru

Evgeniy Yu. KRUGLOV, Cand. Sci. (Eng.), Senior Researcher, Educational-Scientific Complex of Fire Safety of Protected Objects, the State Fire Academy of the Ministry of Russian Federation for Civil Defense, Emergencies and Elimination on Consequences of Natural Disasters, Borisa Galushkina St., 4, Moscow, 129366, Russian Federation; ORCID: 0000-0003-3684-5083; e-mail: 89268196698@mail.ru

Roza M. ASEEEVA, Dr. Sci. (Chem.), Professor, Educational-Scientific Complex of Fire Safety of Protected Objects, the State Fire Academy of the Ministry of Russian Federation for Civil Defense, Emergencies and Elimination on Consequences of Natural Disasters, Borisa Galushkina St., 4, Moscow, 129366, Russian Federation; ORCID: 0000-0002-2940-9155; e-mail: rm-aseeva@yandex.ru

Erkebulan M. SHAPIKHOV, Adjunct, Educational-Scientific Complex of Fire Safety of Protected Objects, the State Fire Academy of the Ministry of Russian Federation for Civil Defense, Emergencies and Elimination on Consequences of Natural Disasters, Borisa Galushkina St., 4, Moscow, 129366, Russian Federation; SPIN-code: 1845-7586; ORCID: 0000-0003-4902-126X; e-mail: erkebulan.shapikhov@mail.ru

Contribution of the authors:

Artem A. Kobelev — the concept of the study; writing the introduction, conclusion; revision of the text; work with the editors.

Yuriy K. Naganovskiy — development of the methodology of the experiment; conducting the experiment.

Evgeniy Yu. Kruglov — provision of materials for research.

Roza M. Aseeva — scientific guidance; analysis of experimental results.

Erkebulan M. Shapikhov — experiment processing; preparation of the graphic part.

The authors declare no conflicts of interests.

Апробация вычислительной методики определения тепловых нагрузок при авариях, сопровождающихся огневыми шарами

Рустам Рашитович Шангараев ✉

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

АННОТАЦИЯ

Введение. Крупные пожары достаточно часто сопровождаются образованием огневых шаров (ОШ), которые создают значительные тепловые нагрузки. В результате охвата пожаром емкости, содержащей перегретую жидкость, происходит физический взрыв, из-за чего высвобождается значительное количество топлива, образующего огневой шар. Данное явление опасно тем, что при коротком времени жизни оно способно нанести термические травмы на значительных расстояниях. Существующие методы прогнозирования последствий огневого шара, изложенные в различной отечественной нормативной документации и зарубежной литературе, не в полной мере отражают возможные значения тепловых нагрузок. В связи с этим была разработана вычислительная методика определения тепловых нагрузок, учитывающая перемещение огневого шара.

Цели и задачи. Целью настоящего исследования является апробация разработанной вычислительной методики определения тепловых нагрузок, в которой учитываются кинематические характеристики огневого шара. В исследовании решались следующие задачи:

- проверить работоспособность модели подъема огневого шара;
- провести сравнительный анализ тепловых нагрузок по разработанной методике с результатами расчета отечественных и зарубежных методик;
- провести вычислительный эксперимент по влиянию подвижности воздушной среды (влиянию ветра 7 м/с) на тепловые нагрузки.

Методы исследования. Для проверки работоспособности модели подъема ОШ использовались кадры съемки формирования огневого шара. По кадрам съемки отслеживалось положение огневого шара в пространстве и его кинематические характеристики. Используя кинематические параметры, были определены тепловые нагрузки. Для оценки адекватности вычислений тепловых нагрузок использовался сравнительный анализ результатов расчетов разработанной вычислительной методики с результатами расчетов по существующим отечественным и зарубежным методикам. Для обоснования применения разработанной вычислительной методики определения тепловых нагрузок, учитывающей кинематические параметры огневого шара, был проведен вычислительный эксперимент с использованием программно-вычислительного комплекса MATLAB.

Результаты и их обсуждение. Результаты расчета кинематических параметров удовлетворительно коррелируются с результатами математического моделирования. Полученные значения тепловых нагрузок по разработанной вычислительной методике удовлетворительно согласуются с результатами расчетов по существующим отечественным и зарубежным методикам. На основании выполненных в статье расчетов показано, что изменение газодинамических потоков (снос ветром) приводит к значительному изменению поражающих факторов огневых шаров, которые формируются при пожарах в аварийных ситуациях.

Выводы. Результаты проведенных исследований позволили оценить адекватность работоспособности усовершенствованной вычислительной методики определения тепловых нагрузок при авариях, сопровождающихся огневыми шарами, а также обосновать актуальность применения разработанного метода.

Ключевые слова: физический взрыв; диффузионное горение; термическое поражение; численный расчет; перегретая жидкость

Для цитирования: Шангараев Р.Р. Апробация вычислительной методики определения тепловых нагрузок при авариях, сопровождающихся огневыми шарами // Пожаровзрывобезопасность/Fire and Explosion Safety. 2022. Т. 31. № 4. С. 16–26. DOI: 10.22227/0869-7493.2022.31.04.16-26

✉ Шангараев Рустам Рашитович, e-mail: robson-rus7@yandex.ru

Approval of a computational method for determining thermal loads during accidents accompanied by fireballs

Rustam R. Shangaraev ✉

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

ABSTRACT

Introduction. Large fires are quite often accompanied by the formation of fireballs (OSH), which create significant thermal loads. As a result of the fire coverage of a container containing an overheated liquid, a physical explosion occurs, which releases a significant amount of fuel forming a fireball. This phenomenon is dangerous because, with a short lifetime, it is capable of causing thermal injuries over considerable distances. The existing methods of predicting the consequences of a fireball, set out in various domestic regulatory documents and foreign literature, do not fully reflect the possible values of thermal loads. In this regard, a computational method for determining thermal loads was developed, taking into account the movement of the fireball.

Goals and objectives. The purpose of this study is to test the developed computational methodology for determining thermal loads, which takes into account the kinematic characteristics of the fireball. The following tasks were solved in the study:

- check the operability of the fireball lifting model;
- to conduct a comparative analysis of thermal loads according to the developed methodology with the results of calculation of domestic and foreign methods;
- conduct a computational experiment on the effect of air mobility (wind effect of 7 m/s) on thermal loads.

Research methods. To check the operability of the OSH lifting model, footage of the formation of a fireball was used. According to the shooting frames, the position of the fireball in space and its kinematic characteristics were tracked. Using kinematic parameters, thermal loads were determined. To assess the adequacy of calculations of thermal loads, a comparative analysis of the results of calculations of the developed computational methodology with the results of calculations using existing domestic and foreign methods was used. To substantiate the application of the developed computational methodology for determining thermal loads, taking into account the kinematic parameters of the fireball, a computational experiment was conducted using the MATLAB software and computing complex.

Results and their discussion. The results of the calculation of kinematic parameters are satisfactorily correlated with the results of mathematical modeling. The obtained values of thermal loads according to the developed computational methodology are in satisfactory agreement with the results of calculations according to existing domestic and foreign methods. Based on the calculations performed in the article, it is shown that a change in gas dynamic flows (wind demolition) leads to a significant change in the damaging factors of fireballs that are formed during fires in emergency situations.

Conclusions. The results of the research made it possible to assess the adequacy of the performance of the improved computational methodology for determining thermal loads in accidents accompanied by fireballs, as well as to justify the relevance of the application of the developed method.

Keywords: physical explosion; diffusion combustion; thermal empty; numerical calculation; superheated liquid

For citation: Shangaraev R.R. Approval of a computational method for determining thermal loads during accidents accompanied by fireballs. *Pozharovzryvobezopasnost/Fire and Explosion Safety*. 2022; 31(4):16-26. DOI: 10.22227/0869-7493.2022.31.04.16-26 (rus).

✉ Rustam Rashitovich Shangaraev, e-mail: robson-rus7@yandex.ru

Введение

Нередко происходят аварийные ситуации с возникновением огневых шаров (ОШ). Так, например, 10 августа 2020 г. в городе Волгограде произошел взрыв с образованием ОШ на АЗС. В результате взрыва пострадало 12 человек, 4 из них сотрудники пожарной охраны [1]. Или, например, 14 июня 2021 г. в городе Новосибирске взорвались емкости с топливом. Также по причине аварии сформировался огневой шар. Сообщается, что пострадало 24 человека (в том числе сотрудники МЧС), из них 12 в состоянии средней тяжести, 7 — в тяжелом состоянии, остальные на амбулаторном лечении.

Данное явление сопровождается значительным тепловым излучением, которое даже при коротком времени существования приводит к термическим ожогам и гибели людей. Огневые шары возникают при выбросе перегретых углеводородных топлив, в результате чего данная парокапельная смесь с концентрацией выше верхнего концентрационного предела воспламенения начинает прогорать по оболочке по мере поступления кислорода [2–5].

Несомненно, поражающая способность ОШ, в виде теплового излучения, напрямую зависит от его кинематических характеристик.

Существующие нормативные документы, такие как: Национальный стандарт РФ ГОСТ Р 12.3.047–2012 «Система стандартов безопасности труда. Пожарная безопасность технологических процессов. Общие требования. Методы контроля» (далее — ГОСТ); Приказ МЧС России от 10.07.2009 № 404 «Об утверждении методики определения расчетных величин пожарного риска на производственных объектах» (далее — Приказ МЧС), СП 12.13130.2009 «Определение категорий помещений, зданий и наружных установок по взрывопожарной и пожарной опасности (с Изменением № 1)» (далее — СП 12); Методика анализа риска для опасных производственных объектов газодобывающих предприятий ОАО «Газпром» СТО Газпром 2-2.3-400-2009 (далее — стандарт Газпрома); а также [6–8], в которых изложены методики определения поражающих факторов при возникновении огневых шаров, упрощают схематизацию данного явления, а именно предполагают стационарное развитие аварийной ситуации (огневой шар

неподвижен). При учете особенностей настоящих методик была разработана методика определения тепловых нагрузок при авариях, сопровождаемых огневыми шарами, учитывающая его перемещение, которая изложена в [9].

Таким образом, целью настоящего исследования является апробация разработанной вычислительной методики определения тепловых нагрузок, в которой учитываются кинематические характеристики огневого шара. В исследовании решились следующие задачи:

- произведена проверка работоспособности модели подъема огневого шара;
- проведен сравнительный анализ тепловых нагрузок по разработанной вычислительной методике с результатами расчета отечественных и зарубежных моделей;
- проведен вычислительный эксперимент по влиянию подвижности воздушной среды (влиянию ветра 5 м/с) на тепловые нагрузки.

Методы исследования

Научный и практический интерес настоящего исследования заключался в апробации вычислительной методики определения тепловых нагрузок огневого шара с учетом его перемещения. Ее алгоритм представлен ниже.

1. Определение массы вещества, вовлекаемого в ОШ.
2. Определение диаметра ОШ.
3. Определение времени существования ОШ.
4. Определение высоты подъема, используется уравнение (1).
5. Используя уравнение (2), определяем угловой коэффициент облученности.
6. Находим дозу теплового излучения, используя формулу (3).
7. Находим среднюю по времени интенсивность теплового излучения для произвольно ориентированных площадок путем деления дозы теплового излучения, найденной в пункте 5, на время существования, найденное в пункте 3.
8. Определение условной вероятности поражения тепловым излучением человека, используя уравнение (4).

Для этого по кадрам съемки формирования огневого шара в результате разрыва 80-литровой емкости, нагретой до температуры, при которой достигается давление в 3 атмосферы, наблюдались положение огневого шара в пространстве и его кинематические параметры. После этого проводился сравнительный анализ полученных результатов.

На основании расчетов кинематических параметров огневого шара были рассчитаны тепловые потоки. После чего проводился сравнительный анализ

вычисленных тепловых потоков с результатами вычислений отечественных и зарубежных методик.

Проводился вычислительный эксперимент по влиянию сноса огневого шара за счет подвижности воздушной среды с применением программного комплекса MATLAB.

Проверка адекватности показаний вычислительной методики

Для рассмотрения движения огневого шара решалась система дифференциальных уравнений, которая описывает силовое воздействие среды на огневого шар.

$$\begin{cases} \frac{dZ}{dt} = v; \\ \left(m_{\text{пр}} + V_{\text{ш}} \rho_{\text{ш}} \right) \frac{dv}{dt} = \rho_{\text{ср}} V_{\text{ш}} g - \rho_{\text{ш}} V_{\text{ш}} g - C_x S_{\text{ш}} \rho_{\text{ср}} \frac{v^2}{2}, \end{cases} \quad (1)$$

где Z — координата центра ОШ;

v — скорость центральной точки ОШ;

$m_{\text{пр}}$ — присоединенная масса;

$V_{\text{ш}}$ и $S_{\text{ш}}$ — объем и площадь сечения ОШ;

$\rho_{\text{ш}}$ — плотность ОШ;

$\rho_{\text{ср}}$ — плотность среды;

g — ускорение свободного падения;

C_x — коэффициент лобового сопротивления.

Второе уравнение системы (1) представляет собой уравнение Ньютона, примененное к ОШ, на который действуют сила тяжести, сила Архимеда и сила сопротивления движению ОШ со стороны воздуха. Необходимость учета присоединенной массы вытекает из условия малости плотности ОШ и нестационарности задачи на начальном этапе движения ОШ [10–13].

На рис. 1 представлена покадровка процесса формирования огневого шара в результате разрыва 80-литровой бочки с бензином, нагретой до температуры, при которой достигается давление в 3 атмосферы. В результате разрушения образовался огневой шар с максимальным диаметром 21 м.

По данным кадрам отслеживалось положение ОШ в пространстве. Примером обработки кадров является рис. 2.

После чего строились зависимости (рис. 3), характеризующие процесс движения ОШ, а именно координаты центра ОШ от времени, скорости движения центра ОШ от времени и скорости движения центра ОШ от расстояния. Данные зависимости представлены на рис. 3. Полученные данные аппроксимировались полиномом 3-й степени [14–16].

На рис. 3 кривая 1 описывает параметры движения ОШ по кадрам, представленным на рис. 1. Кривая 2 является результатом решения уравнения (1). Видно, что кривые 1 и 2 имеют

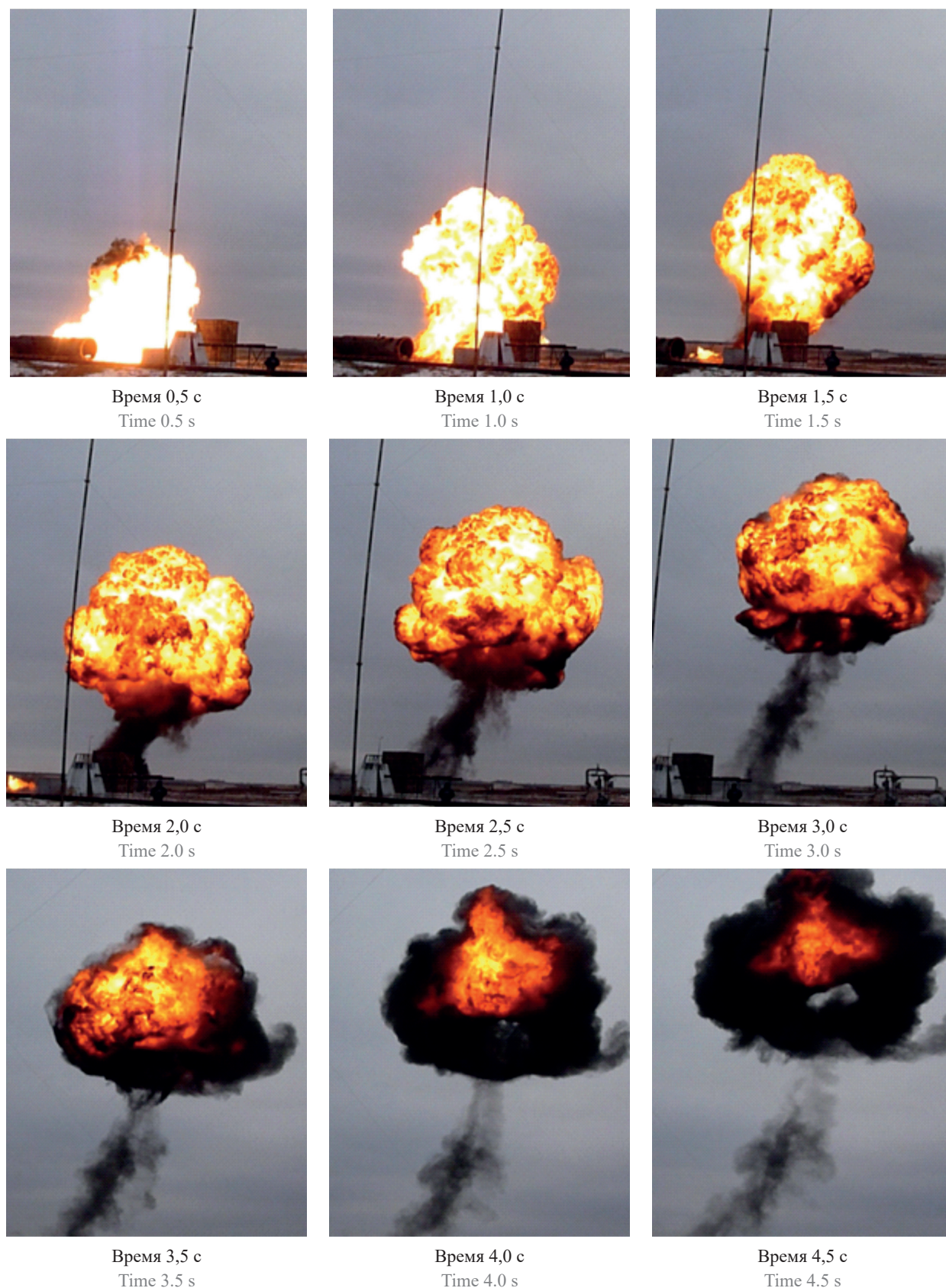


Рис. 1. Образование огневого шара при разрушении емкости с бензином, нагретой до температуры, при которой достигается давление в 3 атмосферы

Fig. 1. The formation of a fireball during the destruction of a container with gasoline heated to a temperature at which a pressure of 3 atmospheres is reached

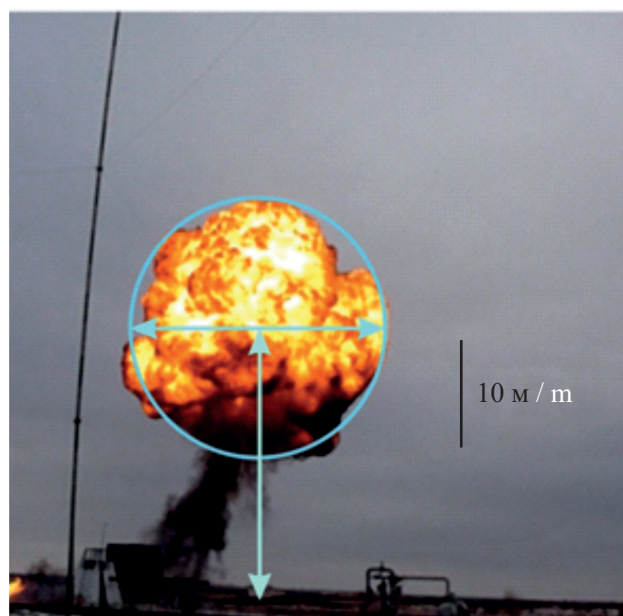


Рис. 2. Обработка кадра съемки процесса формирования огневого шара

Fig. 2. Processing of the shooting frame of the fireball formation process

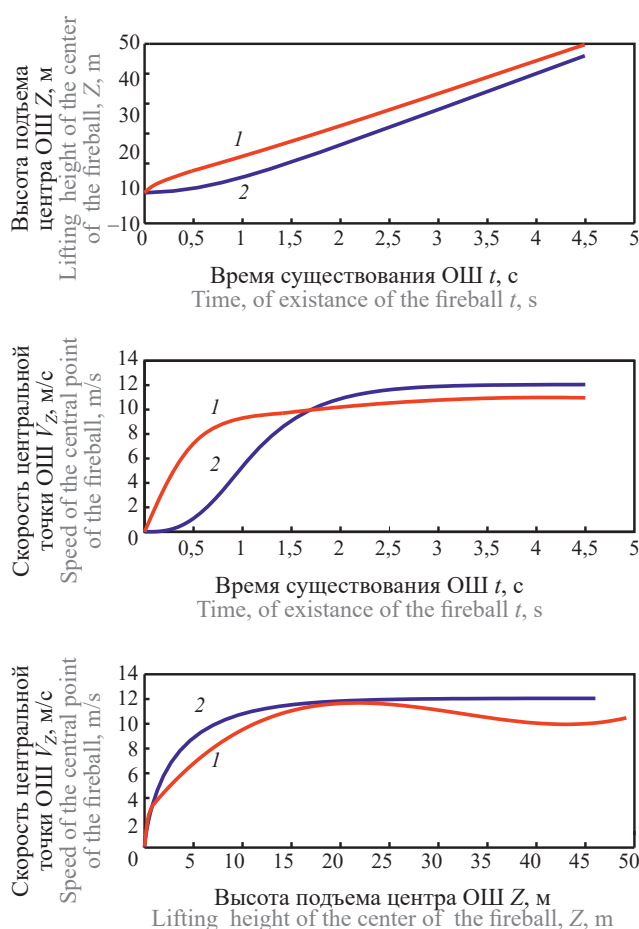


Рис. 3. Зависимости кинематических параметров от времени и высоты подъема ОШ

Fig. 3. Dependences of the kinematic parameters on the time and height of the rise of the fireball

удовлетворительную сходимость, таким образом, кинематические характеристики огневого шара (рис. 1) удовлетворительно согласуются с результатами расчета системы дифференциального уравнения (1). Данное утверждение дает основание полагать что уравнение (1), основанное на классических законах механики, удовлетворительно описывает процесс передвижения огневого шара.

Владея кинематическими характеристиками, описывающими движение ОШ, можно прогнозировать возможные тепловые нагрузки. Для этого необходимо использовать известное соотношение [17–20], описывающее значение углового коэффициента переноса диффузного излучения (F_q) от сферы с радиусом R_S на элементарную площадку, находящуюся от излучателя на расстоянии R :

$$F_q = \frac{\cos \varphi}{R^2} \cdot R_S^2, \quad (2)$$

где φ — угол между нормалью к площадке и вектором, соединяющим центр шара и центр площадки.

Для определения интенсивности теплового излучения необходимо знать среднеповерхностную тепловую мощность излучения. В ряде нормативных документов предлагают использовать постоянные значения среднеповерхностной тепловой мощности излучения для всех видов топлива. Например, в СП 12 используется постоянное значение 450 кВт/м², в ГОСТ и приказе МЧС используется значение 350 кВт/м², а в [7] предлагают применять 400 кВт/м². Для бензина плотность теплового излучения не превышает значения в 275 кВт/м² [10].

Следующим немаловажным параметром, определяющим степень теплового поражения, является доза теплового излучения (Q , кДж/м²), которая определяется как интеграл от интенсивности теплового излучения по времени существования огневого шара.

$$Q = \int_0^t q dt, \quad (3)$$

где q — интенсивность теплового излучения, кВт/м²; t — время существования ОШ, с.

Условная вероятность поражения тепловым излучением рассчитывалась в соответствии с нормативными документами [1, 2], по формуле:

$$Pr = -12,8 + 2,56 \cdot \ln(t \cdot q^{4/3}). \quad (4)$$

Проведем расчеты теплового излучения при разрушении емкости с бензином, нагретой до температуры, при которой достигается давление в 3 атмосферы (рис. 1). На рис. 4 представлена схема подъема огневого шара, точками 1–5 отмечены точки

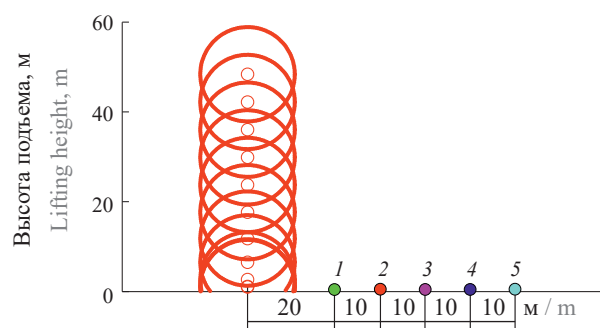


Рис. 4. Схема подъема огневого шара

Fig. 4. Scheme of lifting the fireball

замеров теплового излучения. Точка 1 соответствует расстоянию 20 м от проекции центра огневого шара на земле, остальные точки (2–5) соответственно равны расстояниям 30, 40, 50 и 60 м.

Из соотношения (2) следует, что распространение излучения напрямую зависит от положения объекта. Поэтому на рис. 5 представлено изменение теплового излучения в зависимости от времени для точек 1–5 для вертикально и горизонтально ориентированных площадок.

Поражающие параметры, такие как максимальная ($q_{\max}$) и средняя интенсивность теплового излучения для вертикально ($q_{m,x}$) и горизонтально ($q_{m,z}$) ориентированной площадки, средняя интенсивность

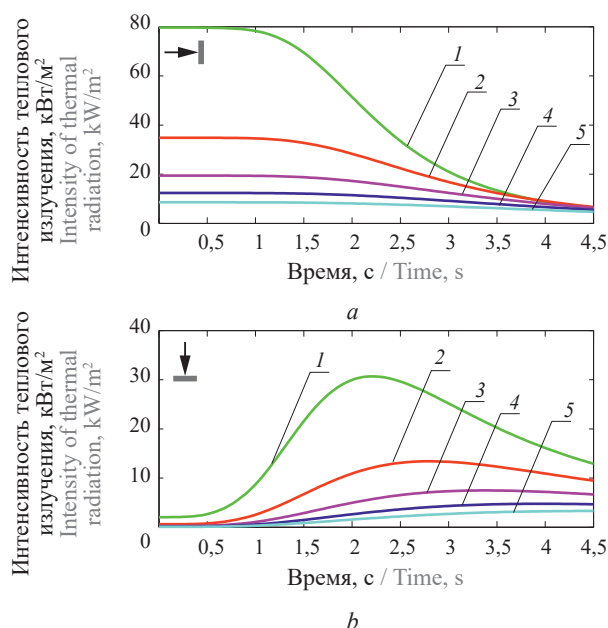


Рис. 5. Зависимости изменения теплового излучения от времени: а — для вертикально ориентированной площадки; б — для горизонтально ориентированной площадки

Fig. 5. Dependences of the change in thermal radiation on time: а — for a vertically oriented site; б — for a horizontally oriented site

теплового излучения при среднем положении к излучателю (q_m), доза теплового излучения (Q) и условная вероятность поражения тепловым излучением занесены в табл. 1.

Таблица 1. Поражающие параметры для «всплывающего» огневого шара (рис. 1)

Table 1. Striking parameters for a “lifting” fireball (Fig. 1)

Параметры поражающих факторов Parameters of damaging factors	Расстояние от центра взрыва, м Distance from the center of the explosion, m				
	20	30	40	50	60
Интенсивность теплового излучения $q_{m,z}$, кВт/м ² (горизонтальная ориентация) Thermal radiation intensity $q_{m,z}$, kW/m ² (horizontal orientation)	17,7	8,74	4,97	3,06	2,007
Интенсивность теплового излучения $q_{m,x}$, кВт/м ² (вертикальная ориентация) Thermal radiation intensity $q_{m,x}$, kW/m ² (vertical orientation)	29,5	13,1	7,3	4,7	3,2
Интенсивность теплового излучения q_m , кВт/м ² (среднее положение к излучателю) Thermal radiation intensity q_m , kW/m ² (middle position to the emitter)	40,3	22,5	14,3	9,9	7,2
Доза теплового излучения, кДж/м ² Dose of thermal radiation, kJ/m ²	184,05	39,7	22,6	13,9	9,1
Вероятность поражения человека, % Probability of human injury, %	9	0	0	0	0

Для проверки адекватности работы вычислительной методики [9] сравним параметры теплового излучения с показателями теплового излучения по существующим методикам. В существующих отечественных нормативных документах — ГОСТ и СП 12 — предполагается, что объект, принимающий тепловое излучение, находится на земле и имеет среднее положение к излучателю. На рис. 6 изображены зависимости интенсивности теплового излучения от расстояния по существующим отечественным и зарубежным методикам: ГОСТ, СП 12, Приказ МЧС, стандарт Газпрома, [6–8].

На зависимости, представленной на рис. 6, изображена кривая разработанной вычислительной методики [9], которая строилась по вычислениям интенсивности теплового излучения для среднего положения к излучателю. Из рис. 6 видно, что приблизительно на расстоянии до 20 м все методики дают разные показатели теплового излучения, после 20 м значения теплового излучения практически схожи. Показатели теплового излучения по различным методикам занесены в табл. 2.

По табл. 1 можно понять, что разработанная методика дает адекватные показатели тепловой мощности. Напомним, что методики ГОСТ, СП 12, Приказ МЧС, стандарт Газпрома, [6–8] предполагают, что огневой шар неподвижен, но на рис. 1 хорошо видно, что воздушные потоки сносят огневой шар.

При обработке кадров (рис. 1 и 2) было выявлено, что снос ветром огневого шара происходил со средней скоростью 7 м/с. Исходя из этого рассмотрим влияние бокового ветра со скоростью 7 м/с на показатели теплового излучения при «всплывающем» огневом шаре (рис. 7).

Таблица 2. Показания теплового излучения по существующим методикам

Table 2. Indications of thermal radiation according to existing methods

Методика Methodology	Интенсивность теплового излучения, кВт/м ² Intensity of thermal radiation, kW/m ²				
	20 м / m	30 м / m	40 м / m	50 м / m	60 м / m
1, 2	35,9	22,3	14,5	10,04	7,2
3	25,9	12,8	6,7	3,8	2,3
4	47,9	23,5	13,6	8,8	6,1
5	39,56	21,4	12,9	8,4	5,9
6	57,85	27,8	15,6	9,5	6,1
7	49,4	23,8	13,7	8,8	6,1
Разработанная методика Developed methodology	40,3	22,5	14,3	9,9	7,2

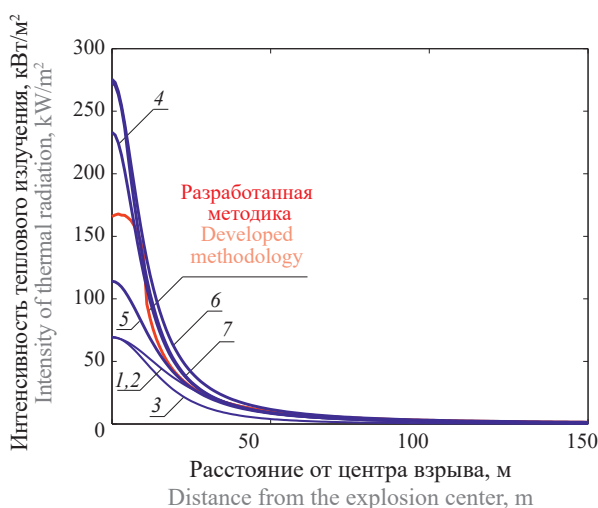


Рис. 6. Зависимость изменения интенсивности теплового излучения от расстояния по существующим методикам: 1 — Национальный стандарт РФ ГОСТ Р 12.3.047–2012 «Система стандартов безопасности труда. Пожарная безопасность технологических процессов. Общие требования. Методы контроля»; 2 — Приказ МЧС России от 10.07.2009 № 404 «Об утверждении методики определения расчетных величин пожарного риска на производственных объектах»; 3 — СП 12.13130.2009 Определение категорий помещений, зданий и наружных установок по взрывопожарной и пожарной опасности (с Изменением № 1); 4 — Методика анализа риска для опасных производственных объектов газодобывающих предприятий ОАО «Газпром» СТО Газпром 2-2.3-400-2009; 5 — J. Casal, J. Arnaldos, H. Montiel, E. Planas-Cuchi, J.A. Vilchez. Modeling and understanding BLEVEs. Centre d'Estudis del Risc Tecnologic (CERTEC), Universitat Politècnica de Catalunya — Institut d'Estudis Catalans, Barcelona, Catalonia, Spain; 6 — William E. Martinsen and Jeffrey D. Marx. An improved model for the prediction of radiant heat from fireballs. 1999 International Conference and Workshop on Modeling Consequences of Accidental Releases of Hazardous Materials San Francisco, California September 28 — October 1, 1999; 7 — Guidelines for evaluating the characteristics of vapor cloud explosions, flash fires, and BLEVES. New York: American Institute of Chemical Engineers, 1994

Fig. 6. Dependence of the change in the intensity of thermal radiation on the distance according to existing methods: 1 — GOST R 12.3.047—2012. Occupational safety standards system. Fire safety of technological processes. General requirements. Methods of control. (rus.); 2 — Order of the EMERCOM of Russia dated July 10, 2009 No. 404 “On approval of the methodology for determining the estimated values of fire risk at production facilities” (rus.); 3 — SP 12.13130.2009. Determination of categories of rooms, buildings and external installations on explosion and fire hazard. (rus.); 4 — Risk Analysis Methodology for Hazardous Production Facilities of Gas Production Enterprises of OAO Gazprom STO Gazprom 2-2.3-400-2009 (rus.); 5 — J. Casal, J. Arnaldos, H. Montiel, E. Planas-Cuchi, J.A. Vilchez. Modeling and understanding BLEVEs. Centre d'Estudis del Risc Tecnologic (CERTEC), Universitat Politècnica de Catalunya — Institut d'Estudis Catalans, Barcelona, Catalonia, Spain; 6 — William E. Martinsen and Jeffrey D. Marx. An improved model for the prediction of radiant heat from fireballs. 1999 International Conference and Workshop on Modeling Consequences of Accidental Releases of Hazardous Materials San Francisco, California September 28 — October 1, 1999; 7 — Guidelines for evaluating the characteristics of vapor cloud explosions, flash fires, and BLEVES. New York: American Institute of Chemical Engineers, 1994

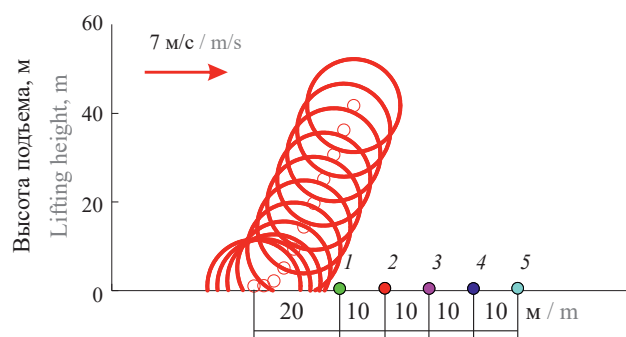


Рис. 7. Схема подъема огневого шара с влиянием бокового ветра со скоростью 7 м/с

Fig. 7. Scheme of lifting a fireball with the influence of a side wind at a speed of 7 m/s

Моментальные тепловые нагрузки, возникаемые при «всплытии» и перемещении огневого шара, представлены на рис. 8. Числовые значения поражающих параметров занесены в табл. 3.

Из представленных расчетов видно, что при смещении огневого шара в сторону расчетных точек (1–5) увеличиваются поражающие параметры, данная закономерность обусловлена тем, что при увеличении интенсивности теплового излучения увеличивается доза теплового излучения, в свою очередь и увеличивается условная вероятность поражения тепловым излучением. Из этого следует, что при авариях с образованием огневого шара необходимо учитывать влияние газодинамических потоков. Подробно влияние газодинамических потоков на тепловые и взрывные нагрузки представлено в работах [10, 21–24].

Таблица 3. Поражающие параметры ОШ при «всплытии» и смещении

Table 3. The striking parameters of the fireball during the “lifting” and displacement

Параметры поражающих факторов Parameters of damaging factors	Расстояние от центра взрыва, м Distance from the center of the explosion, m				
	20	30	40	50	60
Интенсивность теплового излучения $q_{m,z}$, кВт/м ² (горизонтальная ориентация) Thermal radiation intensity $q_{m,z}$, kW/m ² (horizontal orientation)	45,7	22,6	12,8	7,7	4,8
Интенсивность теплового излучения $q_{m,x}$, кВт/м ² (вертикальная ориентация) Thermal radiation intensity $q_{m,x}$, kW/m ² (vertical orientation)	50,7	27,5	18,4	13,2	9,8
Интенсивность теплового излучения q_m , кВт/м ² (среднее положение к излучателю) Thermal radiation intensity q_m , kW/m ² (middle position to the emitter)	68,2	35,5	22,4	15,28	10,91
Доза теплового излучения, кДж/м ² Dose of thermal radiation, kJ/m ²	306,9	159,7	100,8	68,76	49,05
Вероятность поражения человека, % Probability of human injury, %	67,5	3,9	0	0	0

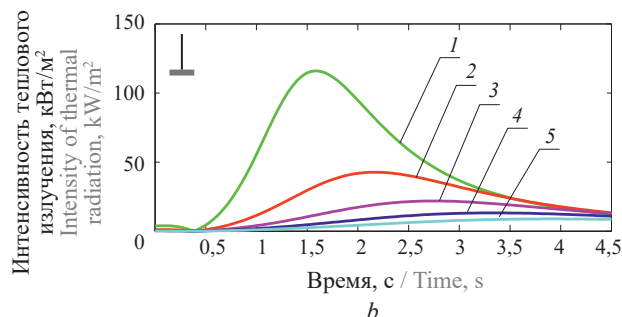
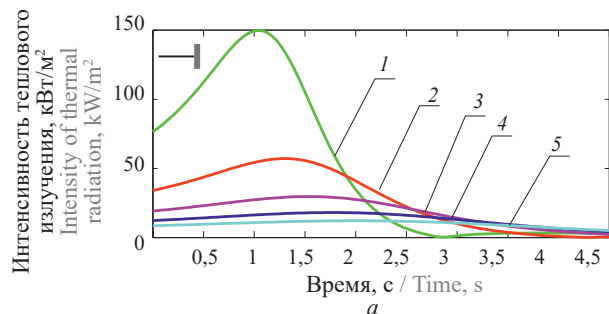


Рис. 8. Зависимость изменения теплового излучения от времени с влиянием бокового ветра со скоростью 7 м/с: а — для вертикально ориентированной площадки; б — для горизонтально ориентированной площадки

Fig. 8. Dependence of the change in thermal radiation on time with the influence of a side wind at a speed of 7 m/s: a — for a vertically oriented site; b — for a horizontally oriented site

Также разработанная вычислительная методика позволяет измерять тепловое поражение не только на поверхности земли, в отличие от методик ГОСТ, СП 12, Приказ МЧС, стандарт Газпрома, [6–8], но и в любой точке пространства. Основным пре-

имуществом разработанной вычислительной методики является учет передвижения огневого шара, а в условиях плотной застройки, вблизи уникальных (атомные электростанции, объекты культурного наследия и т.п.) объектов данное преимущество является достаточно востребованным.

Выводы

Сравнительный анализ кинематических параметров огневого шара в случае разрыва емкости с бензином и результаты математического моделирования подъема огневого шара показали удовлетворительную сходимость сравниваемых параметров.

Сравнительный анализ рассчитанных значений тепловых нагрузок огневого шара разработанной методики и результаты расчетов по существующим отечественным и зарубежным методикам показали адекватность значений теплового излучения разработанной вычислительной методики.

Вычислительный эксперимент по влиянию газодинамических потоков на тепловые нагрузки позволил оценить вероятные тепловые нагрузки в случае сноса огневого шара. Также дал возможность выявить очевидную закономерность, что в случае смещения воздушной среды параметры поражающих факторов существенно изменяются.

Результаты проведенных исследований позволили апробировать разработанную методику определения тепловых нагрузок при авариях, сопровождаемых огневыми шарами.

Известные отечественные и зарубежные методики расчета тепловых нагрузок не учитывают движение огневого шара и, по сути, рассматривают статическую задачу. Разработанная вычислительная методика позволяет учитывать перемещение в отличие от отечественных и зарубежных аналогов, что наиболее актуально в случаях плотной городской застройки, вблизи уникальных объектов.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Комаров А.А., Шангараев Р.Р., Бегишев И.Р. Верификация методики определения тепловых нагрузок при формировании огневых шаров // Безопасность труда в промышленности. 2022. № 5. С. 15–21. DOI: 10.24000/0409-2961-2022-5-15-21
2. Елизарьев А.Н., Ахтямов Р.Г., Киселева М.А., Тараканов Д.А., Тараканов Дм.А., Яковлев Д.О. и др. Развитие методических основ оценки возникновения эффекта BLEVE при авариях на объектах хранения топлив // Известия Петербургского университета путей сообщения. 2019. Т. 16. № 1. С. 157–167. DOI: 10.20295/1815-588X-2019-1-157-167 URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=38032989>
3. Davidy A. CFD simulation and mitigation with Boiling Liquid Expanding Vapor Explosion (BLEVE) Caused by Jet Fire // ChemEngineering. 2018. Vol. 3. Issue 1. P. 1. DOI: 10.3390/chemengineering3010001
4. Sellami I., Manescau B., Chetehouna K., de Izarra C., Nait-Said R., Zidani F. BLEVE fireball modeling using Fire Dynamics Simulator (FDS) in an Algerian gas industry // Journal of Loss Prevention in the Process Industries. 2018. Vol. 54. Pp. 69–84. DOI: 10.1016/j.jlp.2018.02.010
5. Wang Y., Gu X., Xia L., Pan Y., Ni Y., Wang S. et al. Hazard analysis on LPG fireball of road tanker BLEVE based on CFD simulation // Journal of Loss Prevention in the Process Industries. 2020. Vol. 68. P. 104319. DOI: 10.1016/j.jlp.2020.104319
6. Casal J., Arnaldos J., Montiel H., Planas-Cuchi E., Vi'chez J.A. Modelling and understanding BLEVEs // Chapter 22 of The handbook of hazardous materials spills technology. Edited by Merv Fingas. Mc-Graw Hill, USA, 2001.
7. Martinsen W.E., Marx J.D. An improved model for the prediction of radiant heat flux from fireballs // International Conference and Workshop on Modeling the Consequences of Accidental Releases of Hazardous Materials. Center for Chemical Process Safety of the American Institute of Chemical Engineers, 1999. Pp. 605–621.
8. Guidelines for evaluating the characteristics of vapor cloud explosions, flash fires, and BLEVES. New York : American Institute of Chemical Engineers, 1994. 8 p.
9. Шангараев Р.Р. Математическая модель определения тепловых нагрузок при авариях, сопровождаемых огневыми шарами // Гражданская оборона на страже мира и безопасности : мат. VI Междунар. науч.-практ. конф., посвящ. всемирному дню гражданской обороны. М., 2022. С. 277–282.
10. Комаров А.А. Газодинамические потоки при авариях, сопровождаемых огневыми шарами // Современные проблемы гидравлики и гидротехнического строительства : сб. тезисов докладов IV Всеросс. науч.-практ. семинара. М., 2021. С. 79.
11. Sovran G., Morel T., Mason W.T. Aerodynamic drag mechanisms of bluff bodies and road vehicles. New York : Plenum Press, 1978. 360 p.
12. Блинков Ю.А., Панкратов И.А., Симонова К.Р. Расчет обтекания шара с помощью стандартных решателей OpenFOAM // Математика. Механика. 2018. № 20. С. 94–96. URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=36930621>
13. Komarov A.A., Gromov N.V., Korolchenko O.N. Ensuring blast resistance of critically important

- buildings and constructions in case of Air Crash // IOP Conference Series : Materials Science and Engineering. 2021. Vol. 1066. Issue 1. P. 012005. DOI: 10.1088/1757-899X/1066/1/012005
14. Данилов А.М., Гарькина И.А. Интерполяция, аппроксимация, оптимизация: анализ и синтез сложных систем : монография. Пенза : ПГУАС, 2014. 168 с.
 15. Гребенникова И.В. Методы математической обработки экспериментальных данных : учеб.-метод. пос. Екатеринбург, 2015. 124 с.
 16. Дьяконов В.П. MATLAB. Полный самоучитель. М. : Профобразование, 2019. 768 с.
 17. Sam Mannan. PE, CSP Lee's loss prevention in the process industries hazard identification // Assessment and Control. Volume 1 Third edition. Texas, USA : Department of Chemical Engineering, 2005. 172 p.
 18. Комаров А.А. Прогнозирование нагрузок от аварийных дефлаграционных взрывов и оценка последствий их воздействия на здания и сооружения : автореф. дис. ... д-ра тех. наук. М. : МГСУ, 2001. 42 с.
 19. Кошмаров Ю.А., Башкирцев М.П. Термодинамика и теплопередача в пожарном деле. М. : Высшая инженерная и пожарно-техническая школа МВД СССР, 1987. 440 с.
 20. Башкирцев М.П. Основы пожарной теплофизики. М. : Стройиздат, 1978. 198 с.
 21. Шангареев Р.Р. Численный эксперимент по влиянию газодинамических потоков на тепловые нагрузки при образовании огневых шаров // Системы безопасности — 2021 : мат. тридцатой Междунар. науч.-техн. конф. М. : Академия ГПС МЧС России, 2021. С. 205–208.
 22. Комаров А.А., Бузаев Е.В., Васюков Г.В., Загуменников Р.А. Моделирование аварийных выбросов взрывоопасных веществ в помещении // Вестник МГСУ. 2014. № 10. С. 132–140. DOI: 10.22227/1997-0935.2014.10.132-140
 23. Komarov A.A., Bazhina E.V., Bobrov Yu. Relationship between gas-dynamic flows and impacts of emergency explosions indoors // MATEC Web of Conferences. 2016. Vol. 86. P. 04048. DOI: 10.1051/mateconf/20168604048
 24. Komarov A.A., Gromov N.V. Experimental observation of visible flame propagation rate in accidental deflagration explosions and explosive load reduction // MATEC Web of Conferences. 2018. Vol. 251. P. 02024. DOI: mateconf/201825102024

REFERENCES

1. Komarov A.A., Shangaraev R.R., Begishev I.R. Verification of the methodology for determining thermal loads during fireballs formation. *Occupational Safety in Industry*. 2022; 5:15-21. DOI: 10.24000/0409-2961-2022-5-15-21 (rus).
2. Elizarev A.N., Akhtyamov R.G., Kiseleva M.A., Tarakanov D.A., Tarakanov Dm.A., Yakovlev D.O. et al. Development of basic procedures for evaluation of occurrence of BLEVE effect in accidents at fuel storage facilities. *Proceedings of Petersburg Transport University*. 2019; 16(1):157-167. DOI: 10.20295/1815-588X-2019-1-157-167 URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=38032989> (rus).
3. Davidy A. CFD simulation and mitigation with Boiling Liquid Expanding Vapor Explosion (BLEVE) Caused by Jet Fire. *ChemEngineering*. 2018; 3(1):1. DOI: 10.3390/chemengineering3010001
4. Sellami I., Manescau B., Chetehouna K., de Izarra C., Nait-Said R., Zidani F. BLEVE fireball modeling using Fire Dynamics Simulator (FDS) in an Algerian gas industry. *Journal of Loss Prevention in the Process Industries*. 2018; 54:69-84. DOI: 10.1016/j.jlp.2018.02.010
5. Wang Y., Gu X., Xia L., Pan Y., Ni Y., Wang S. et al. Hazard analysis on LPG fireball of road tanker BLEVE based on CFD simulation. *Journal of Loss Prevention in the Process Industries*. 2020; 68. DOI: 10.1016/j.jlp.2020.104319
6. Casal J., Arnaldos J., Montiel H., Planas-Cuchi E., Viñchez J.A. Modelling and understanding BLEVEs. *Chapter 22 of the handbook of hazardous materials spills technology*. Merv Fingas (ed). Mc-Graw Hill, USA, 2001.
7. Martinsen W.E., Marx J.D. An improved model for the prediction of radiant heat from fireballs. *International Conference and Workshop on Modeling the Consequences of Accidental Releases of Hazardous Materials*. Center for Chemical Process Safety of the American Institute of Chemical Engineers, 1999; 605-621.
8. *Guidelines for evaluating the characteristics of vapor cloud explosions, flash fires, and BLEVES*. New York, American Institute of Chemical Engineers, 1994; 8.
9. Shangaraev R.R. Mathematical model for determining thermal loads in accidents accompanied by fireballs. *Civil Defense on Guard of Peace and Safety : materials of the Sixth International Scientific and practical conference dedicated to the world civil defense day*. Moscow, Akademiya GPS MChS Rossii, 2022; 277-282. (rus).
10. Komarov A.A. Gas-dynamic flows during accidents accompanied by fireballs. *Modern Problems of Hydraulics and Hydraulic Engineering Construction : collection of abstracts of the IV All-Russian scientific and practical seminar*. Moscow, 2021; 79. (rus).
11. Sovran G., Morel T., Mason W.T. *Aerodynamic drag mechanisms of bluff bodies and road vehicles*. New York, Plenum Press, 1978; 360.
12. Blinkov Yu.A., Pankratov I.A., Simonova K.R. Calculation of the flow around a ball using standard OpenFOAM solvers. *Mathematics. Mechanics*.

- 2018; 20:94-96. URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=36930621> (rus).
13. Komarov A.A., Gromov N.V., Korolchenko O.N. Ensuring blast resistance of critically important buildings and constructions in case of air crash. *IOP Conference Series : Materials Science and Engineering*. 2021; 1066(1):012005. DOI: 10.1088/1757-899X/1066/1/012005
14. Danilov A.M., Gar'kina I.A. *Interpolation, approximation, optimization: analysis and synthesis of complex systems : monograph*. Penza, PGUAS, 2014; 168. (rus).
15. Grebennikova I.V. *Methods of mathematical processing of experimental data : teaching aid*. Ekaterinburg, 2015; 124. (rus).
16. D'yakov V.P. *MATLAB. Complete tutorial*. Moscow, Profobrazovanie Publ., 2019; 768. (rus).
17. Mannan S. PE, CSP Lee's loss prevention in the process industries hazard identification. *Assessment and Control. Volume 1 Third edition*. Texas, USA, Department of Chemical Engineering, 2005; 172.
18. Komarov A.A. *Forecasting loads from emergency deflagration explosions and assessing the consequences of their impact on buildings and structures : Abstract of the dissertation for the degree of Dr of Tech. Sci*. Moscow, 2001; 42. (rus).
19. Koshmarov Yu.A., Bashkirtsev M.P. *Thermodynamics and heat transfer in fire fighting*. Moscow, Higher Engineering and Fire-Technical School of the Ministry of Internal Affairs of the USSR, 1987; 440. (rus).
20. Bashkirtsev M.P. *Fundamentals of fire thermophysics*. Moscow, Stroyizdat Publ., 1978; 198. (rus).
21. Shangaraev R.R. *Numerical experiment on the influence of gas-dynamic flows on thermal loads during the formation of fireballs : Proceedings of the thirtieth international scientific and technical conference "Security Systems-2021"*. Moscow, Academy of the State Fire Service of the Ministry of Emergency Situations of Russia, 2021; 205-208. (rus).
22. Komarov A.A., Buzaev E.V., Vasyukov G.V., Zagumennikov R.A. Simulation of Accidental Emissions of Explosive Substances in Premises. *Vestnik MGSU [Monthly Journal on Construction and Architecture]*. 2014; 10:132-140. DOI: 10.22227/1997-0935.2014.10.132-140 (rus).
23. Komarov A.A., Bazhina E.V., Bobrov Yu. Relationship between gas-dynamic flows and impacts of emergency explosions indoors. *MATEC Web of Conferences*. 2016; 86:04048. DOI: 10.1051/matecconf/20168604048
24. Komarov A.A., Gromov N.V. Experimental observation of visible flame propagation rate in accidental deflagration explosions and explosive load reduction. *MATEC Web of Conferences*. 2018; 251:02024. DOI: 10.1051/matecconf/201825102024

Поступила 01.06.2022, после доработки 20.06.2022;
принята к публикации 11.07.2022

Received June 1, 2022; Received in revised form June 20, 2022;
Accepted July 11, 2022

Информация об авторе

ШАНГАРАЕВ Рустам Рашитович, адъюнкт, 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; РИНЦИД: 1064932; ORCID: 0000-0002-4300-8366; e-mail: robson-rus7@yandex.ru

Information about the author

Rustam R. SHANGARAEV, Postgraduate Student, the State Fire Academy of the Ministry of Russian Federation for Civil Defense, Emergencies and Elimination on Consequences of Natural Disasters, Borisa Galushkina St., 4, Moscow, 129366, Russian Federation; ID RISC: 1064932; ORCID: 0000-0002-4300-8366; e-mail: robson-rus7@yandex.ru

ПОЖАРОВЗРЫВБЕЗОПАСНОСТЬ/FIRE AND EXPLOSION SAFETY. 2022. Т. 31. № 4. С. 27–37
POZHAROVZRYVOBEZOPASNOST/FIRE AND EXPLOSION SAFETY. 2022; 31(4):27-37

НАУЧНО-АНАЛИТИЧЕСКАЯ СТАТЬЯ/SCIENTIFIC AND ANALYTICAL PAPER

УДК 614.841

<https://doi.org/10.22227/0869-7493.2022.31.04.27-37>

Анализ методов определения коэффициента участия горючих газов и паров во взрыве при установлении категории помещения по взрывопожарной и пожарной опасности

Геннадий Тимофеевич Земский¹ ✉, Леонид Петрович Вогман¹,
Наталья Валентиновна Кондратюк¹, Дмитрий Александрович Корольченко²

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

² Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет, г. Москва, Россия

АННОТАЦИЯ

Введение. Многочисленные публикации на тему о категорировании помещений, зданий и наружных установок по взрывопожарной и пожарной опасности разделены авторами на три группы: 1) действующие источники информации (в том числе ведомственные и региональные), а также действующие ранее источники; 2) учебники и пособия по категорированию; 3) публикации, в которых находят подтверждение (опровержение) или уточнение некоторые положения, отраженные в источниках нормативного характера. Данная статья относится к третьей группе публикаций.

Цель. Рассмотрение различных методов определения коэффициента Z , выявление положительных и отрицательных сторон каждого метода, а также разработка предложений по их применению.

Задачи. Определить коэффициент участия вещества во взрыве, показать работоспособность того или иного метода его определения на конкретных примерах.

Результаты и их обсуждение. Из представленного анализа методов определения коэффициента Z участия паров ЛВЖ во взрыве следует, что он может быть установлен тремя способами:

- табличным (по максимально возможному табличному значению: для водорода $Z = 1$; для газов и аэрозолей $Z = 0,5$; для паров ЛВЖ $Z = 0,3$);
- расчетным на основе характера распределения газов и паров в объеме помещения, однако при использовании расчетного метода велика вероятность ошибки, обусловленной многочисленными условиями применимости метода, возможно получение необъяснимого значения Z более 1. Кроме того, расчетный метод весьма трудоемкий. Для его применения необходимо уточнение условий, при которых он может быть использован;
- графическим (по графику зависимости Z от параметра X). Этот метод является наиболее простым и надежным. При использовании графического метода определения коэффициента Z следует принимать коэффициент избытка окислителя равным близким к единице, параметр X следует рассчитывать по формуле $X = 0,99P_{\text{н}}/C_{\text{ст}}$.

Выводы. Графический метод определения величины Z отличается простотой и надежностью. При определении параметра X используется коэффициент избытка воздуха $\varphi = 1,9$, что приводит к занижению коэффициента участия паров во взрыве Z . Чтобы избежать неоправданного занижения коэффициента Z , целесообразно не учитывать коэффициент избытка воздуха или принимать его равным 0,99.

Ключевые слова: категорирование; легковоспламеняющаяся жидкость; давление насыщенных паров; стехиометрическая концентрация; взрывоопасная среда; расчетный метод определения; графический метод определения

Для цитирования: Земский Г.Т., Вогман Л.П., Кондратюк Н.В., Корольченко Д.А. Анализ методов определения коэффициента участия горючих газов и паров во взрыве при установлении категории помещения по взрывопожарной и пожарной опасности // Пожаровзрывобезопасность/Fire and Explosion Safety. 2022. Т. 31. № 4. С. 27–37. DOI: 10.22227/0869-7493.2022.31.04.27-37

✉ Земский Геннадий Тимофеевич, e-mail: vniipo-3.5.3@ya.ru

Analysis of methods used to identify combustible gas and vapour-related factors contributing to explosions in the context of assigning explosion and fire safety categories to premises

Gennadiy T. Zemskiy¹ ✉, Leonid P. Vogman¹, Natalya V. Kondratyuk¹, Dmitriy A. Korolchenko²

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

² Moscow State University of Civil Engineering (National Research University), Moscow, Russian Federation

ABSTRACT

Introduction. The authors have classified numerous publications, addressing the assignment of explosion and fire safety categories to premises, buildings and outdoor facilities, into the three groups: 1) sources of information that are in effect (including in-house and region-wide documents), sources that were in effect; 2) manuals and guidelines on category assignment; 3) publications that confirm (refute) or clarify some provisions, specified in regulatory sources. This article can be included into the third group of publications.

Goal. Analysis of different methods, used to identify the value of Z factor; identification of strengths and weaknesses of each method, development of recommendations on the application of these methods.

Objectives. The objective is to identify the substance-related factor contributing to explosions, use particular cases to demonstrate the efficiency of this or other identification method.

Results and discussion. The analysis of Z factor identification methods, describing the contribution of vapours of highly flammable liquids to an explosion, has proven that three types of procedures can be used to find the Z factor value:

- the method of tables (that uses the maximal possible tabular value of $Z = 1$; for gases and aerosols $Z = 0.5$; for vapours of highly flammable liquids $Z = 0.3$);
- the computational method based on a pattern of three-dimensional gas and vapour spreading on the premises; however, this method, if applied, may involve a high probability of errors due to numerous conditions limiting its applicability; hence, the unexplainable value of Z may exceed 1. Besides, the computational method is extremely laborious. Its application requires the clarification of conditions for its use;
- the graphical method (based on the dependency graph of Z on the X parameter). This method is the simplest and the most reliable one. When the graphical method is used to find the value of Z, the excess oxidant ratio must be taken as being equal to one, and the X parameter must be calculated according to the following formula: $X = 0.99 P_{s,v}/C_{st,c}$.

Conclusions. The graphical method, used to find the value of Z, is simple and reliable. When the X parameter is identified, the excess air ratio is used: $\phi = 1.9$, which leads to the underestimation of Z, the vapour-related factor contributing to explosions. To prevent the unreasonable underestimation of Z, the excess air ratio must be disregarded or taken as being equal to 0.99.

Keywords: category assignment; highly flammable liquid; pressure of saturated vapour; stoichiometric concentration; explosive environment; computational method; graphical method

For citation: Zemskiy G.T., Vogman L.P., Kondratyuk N.V., Korolchenko D.A. Analysis of methods used to identify combustible gas and vapour-related factors contributing to explosions in the context of assigning explosion and fire safety categories to premises. *Pozharovzryvobezopasnost/Fire and Explosion Safety*. 2022; 31(4):27-37. DOI: 10.22227/0869-7493.2022.31.04.27-37(rus).

✉ Gennadiy Timofeevich Zemskiy, e-mail: vniipo-3.5.3@ya.ru

Введение

Вопросам категорирования объектов (помещений, зданий, наружных установок) посвящено немало публикаций. По своему содержанию их можно разделить на три группы: 1) нормативного и нормативно-правового характера; 2) пояснительно-пособного характера; 3) научно-аналитического характера.

Первую группу образуют действующие нормативные источники информации (в том числе

ведомственные и региональные), а также действующие ранее источники [1–9]. Вторую группу образуют учебники, пособия по категорированию, рекомендации для расчетов [10–20]. Третью группу образуют публикации, в которых находят подтверждение или опровержение или уточнение некоторых положений, отраженных в источниках нормативного или исследовательского характера¹ [21–39].

Настоящая статья претендует на отнесение ее к третьей группе публикаций.

¹ Князев П.Ю. Помещения, подлежащие категорированию по взрывопожарной и пожарной опасности // Лаборатория процессов горения и динамики пожара. URL: firecategory.ru/articles.php?id=27

При категорировании помещений по взрывопожарной опасности возникает необходимость определения коэффициента Z участия газов и паров во взрыве [1, 2]. Коэффициент Z может быть определен тремя способами: расчетом на основе характера распределения газов и паров в объеме помещения; по графику зависимости Z от параметра X (некоторой величины, пропорциональной отношению давления насыщенных паров горючей жидкости к ее стехиометрической концентрации в реакции с кислородом воздуха) и табличным, т.е. быть принятым по максимально возможному табличному значению (для водорода $Z = 1$, для других газов и аэрозолей $Z = 0,5$, для паров легковоспламеняющихся жидкостей (ЛВЖ) $Z = 0,3$).

Целью настоящей публикации является рассмотрение различных методов определения коэффициента Z , выявление положительных и отрицательных сторон каждого метода, а также разработка предложений по их применению. Задачи статьи состоят в том, чтобы на конкретных примерах определения коэффициента участия вещества во взрыве показать работоспособность того или иного метода его определения.

Методы определения коэффициента Z горючих паров и газов, их преимущества и недостатки

Расчетный метод определения коэффициента Z участия горючих паров и газов во взрыве

Согласно [2, 11], расчетное определение коэффициента Z является предпочтительным для следующих условий:

- газы и пары должны иметь температуру не выше температуры окружающей среды;
- образование взрывоопасной среды должно соответствовать случаю, когда действует соотношение:

$$\frac{100m}{(\rho_{г.п} V_{св})} < 0,5C_{НКПР},$$

где m — масса паров ЛВЖ;

$\rho_{г.п}$ — плотность газов, паров;

$V_{св}$ — свободный объем помещения;

$C_{НКПР}$ — нижний концентрационный предел распространения пламени газа или пара (НКПР), % (об.);

- помещение должно быть в форме прямоугольного параллелепипеда с отношением длины к ширине не более пяти.

Если хотя бы одно из этих условий не выполняется, расчетный метод неприменим. Однако известны случаи, когда указанные условия выполняются,

а коэффициент Z получается более 1, что лишено физического смысла.

Рассмотрим на следующем примере определение коэффициента Z расчетным методом.

Имеется помещение размерами: длина 53 м, ширина 48 м, высота 8 м (площадь помещения 2544 м², свободный объем 16 281,6 м³). Максимально возможная температура в помещении 37 °С.

В помещении находится емкость вместимостью 40 л, наполненная бензином марки АИ-93 (л). Свойства жидкости: температура вспышки –36 °С, молекулярная масса 98 г/моль, брутто-формула $C_{7,024}H_{13,706}$ [11], плотность жидкости 761 кг/м³, масса жидкости 30,4 кг, плотность паров бензина, определенная по соотношению [2] 3,85 кг/м³, $C_{НКПР} = 1,06$ % (об.), давление насыщенного пара бензина P_n , рассчитанное с использованием коэффициентов уравнения Антуана: $A = 4,12311$, $B = 664,976$, $C = 221,695$ [11], равно 35,7 кПа.

Вентиляция помещения отсутствует.

Расчет проводим по формулам, рекомендованным в [2].

Проверка на применимость расчетного метода определения Z определяется исходя из следующих данных:

- температура жидкости равна температуре окружающей среды (37 °С);

$$\frac{100m}{(\rho_{г.п} V_{св})} = \frac{100 \cdot 30,4}{(3,85 \cdot 16\,281,6)} = 0,0485$$

$0,5 \cdot C_{НКПР} = 0,5 \cdot 1,06 = 0,53$, при этом $0,0485 < 0,53$;

- соотношение длины к ширине помещения $53/48 = 1,1 < 5$.

Следовательно, расчетный метод в данном примере определения коэффициента Z применим.

Коэффициент Z участия горючих газов и паров, не нагретых выше температуры окружающей среды ЛВЖ, при заданном уровне значимости $Q(C > C)$ рассчитывают по формулам [2, 11]:

- при $X_{НКПР} \leq 1/2L$ и $Y_{НКПР} \leq 1/2S$

$$Z = \frac{5 \cdot 10^{-3} \pi}{m} \rho_{г.п} \left(C_0 + \frac{C_{НКПР}}{\delta} \right) X_{НКПР} Y_{НКПР} Z_{НКПР};$$

- при $X_{НКПР} > 1/2L$ и $Y_{НКПР} > 1/2S$

$$Z = \frac{5 \cdot 10^{-3}}{m} \rho_{г.п} \left(C_0 + \frac{C_{НКПР}}{\delta} \right) FZ_{НКПР}.$$

Определим интенсивность испарения бензина по формуле (А.13) [2]:

$$W = 10^{-6} \cdot 1 \cdot \sqrt{M} \cdot P_n = 3,53 \cdot 10^{-4} \text{ кг/(м}^2 \cdot \text{с)},$$

а количество образующихся паров бензина за 1 час испарения — по формуле (А.12) [2]:

$$m_{\text{н}} = WFT = 3,53 \cdot 10^{-4} \cdot 40 \cdot 3600 = 50,8 \text{ кг.}$$

Поскольку вылилось 30,4 кг жидкости, принимаем количество паров 30,4 кг.

Определим величину предэкспоненциального множителя C_0 , % (об.). При отсутствии подвижности воздушной среды для паров ЛВЖ:

$$C_0 = C_{\text{н}} \left(\frac{m \cdot 100}{C_{\text{н}} \rho_{\text{п}} V_{\text{св}}} \right)^{0,41} =$$

$$= 35,34 \left(\frac{30,4 \cdot 100}{35,34 \cdot 3,85 \cdot 17 \cdot 036} \right)^{0,41} = 2,33.$$

Концентрацию $C_{\text{н}}$ находим по формуле (Д.7) [1]:

$$C_{\text{н}} = 100 P_{\text{н}} / P_0 = \frac{100 \cdot 35,7}{101} = 35,34 \% (\text{об.}).$$

При $P_0 = 10$ кПа, $C_{\text{н}} = 0,99 P_{\text{н}}$.

$$C^* = \phi C_{\text{ст}} = 1,9 \cdot 1,94 = 3,68,$$

где ϕ — эффективный коэффициент избытка горючего, принимаемый равным 1,9.

Стехиометрическая концентрация

$$C_{\text{ст}} = \frac{100}{1 + 4,84\beta} =$$

$$= \frac{100}{(1 + 4,84 \cdot 10,45)} = 1,94.$$

Для горючих веществ, состоящих из атомов С, Н, О, N, S, Si, P, F, Cl, Br, J, стехиометрическая концентрация в % (об.) определяется по формуле [26]:

$$C_{\text{ст}} = \frac{100}{(4,84b + 1)},$$

где $b = m_{\text{C}} + m_{\text{S}} + m_{\text{Si}} + 2,5m_{\text{P}} + 0,25(m_{\text{H}} - m_{\text{x}}) - 0,5m_{\text{O}}$ (m_{C} , m_{S} , m_{Si} , m_{P} , m_{H} , m_{O} — число атомов углерода, серы, кремния, фосфора, водорода и кислорода в молекуле горючего); m_{x} — суммарное число атомов F, Cl, Br, J в молекуле горючего.

Для горючих веществ неизвестного химического состава стехиометрическую концентрацию в реакции горения можно определить по соотношению [4]:

$$C_{\text{ст}} = \frac{3,806}{\Delta H_{\text{ст}}},$$

где 3,806 — коэффициент пропорциональности, определяемый для твердого, жидкого и газообразного горючего при стехиометрическом соотношении с воздухом, МДж;
 $\Delta H_{\text{ст}}$ — теплота сгорания горючего вещества.

Расстояния $X_{\text{НКПР}}$, $Y_{\text{НКПР}}$ и $Z_{\text{НКПР}}$ и время полного испарения 30,4 кг бензина T рассчитывают по формулам:

$$X_{\text{НКПР}} = K_1 L \left(K_2 \cdot \ln \frac{\delta C_0}{C_{\text{НКПР}}} \right)^{0,5} =$$

$$= 1,196 \cdot 52,9 \left[0,6 \cdot \ln \left(\frac{10,45 \cdot 2,16}{1,06} \right) \right]^{0,5} = 85,7 \text{ м;}$$

$$T = \frac{30,4}{3,53 \cdot 10^{-4}} \cdot 40 = 2153 \text{ с;}$$

$$Y_{\text{НКПР}} = K_1 S \left(K_2 \cdot \ln \frac{\delta C_0}{C_{\text{НКПР}}} \right)^{0,5} =$$

$$= 1,196 \cdot 2565,65 \left[0,6 \cdot \ln \left(\frac{10,45 \cdot 2,16}{1,06} \right) \right]^{0,5} = 4142 \text{ м}$$

$$Z_{\text{НКПР}} = K_3 H \left(K_2 \cdot \ln \frac{\delta C_0}{C_{\text{НКПР}}} \right)^{0,5} =$$

$$= 0,04714 \cdot 8,3 \cdot 1,35 = 0,53 \text{ м,}$$

где коэффициент K_1 принимается равным 1,1314 для горючих газов и 1,1958 — для ЛВЖ;

коэффициент K_2 , принимаемый равным 1 для горючих газов и для ЛВЖ: $K_2 = T/3600$; $K_2 = 2153/3600 = 0,6$;

коэффициент K_3 , принимаемый равным 0,0253 для горючих газов при отсутствии подвижности воздушной среды; 0,02828 — для горючих газов при подвижности воздушной среды; 0,04714 — для ЛВЖ при отсутствии подвижности воздушной среды и 0,3536 — для ЛВЖ при подвижности воздушной среды;

H — высота помещения, м;

$\delta = 10,45$ [1].

Поскольку в данном примере $X_{\text{НКПР}} > 1/2L$ и $Y_{\text{НКПР}} > 1/2S$,

$$Z = \frac{5 \cdot 10^{-3}}{m} \rho_{\text{г.л}} \left(C_0 + \frac{C_{\text{НКПР}}}{\delta} \right) FZ_{\text{НКПР}} =$$

$$= \frac{5}{30,4} 10^{-3} \cdot 3,85 \cdot \left(2,16 + \frac{1,06}{10,45} \right) \cdot 2565,65 \cdot 0,55 = 2.$$

Полученная расчетом величина Z не соответствует принятым представлениям о величине коэффициента участия паров во взрыве Z , он должен принимать значения от 0 до 0,3.

Коэффициенты K_1 , K_2 , K_3 , входящие в формулу для определения Z , получены эмпирически с установленной в СП 12.13130 степенью достоверности. Так, коэффициент K_2 , который определяется как отношение времени полного испарения жидкости к величине 3600, может принимать значе-

ния меньше или больше единицы: когда жидкость испаряется более чем за 1 час, величина K_2 имеет значение более единицы; если же жидкость испаряется за время менее 1 часа, величина K_2 имеет значение менее единицы. А это, в свою очередь, зависит (при равных интенсивности испарения и площади испарения) от количества пролитой жидкости.

В частности, если количество пролитой жидкости увеличить в нашем примере в два раза, принять 80 л и разлить ее на те же 40 м², то изменится только коэффициент K_2 и Z станет равным 2,96 (при изменившихся $X_{\text{НКПР}} = 121,2$; $Y_{\text{НКПР}} = 5892$; $Z_{\text{НКПР}} = 0,75$; $K_2 = 1,2$).

Таким образом, коэффициент Z участия паров ЛВЖ во взрыве, определенный расчетным способом, оказывается зависимым от количества пролитой на одной и той же площади жидкости, что не поддается логическому объяснению. Следовательно, применение расчетного метода при вычислении коэффициента Z следует ограничить определенными условиями.

Графический метод определения коэффициента Z участия горючих паров и газов во взрыве

Рассмотрим далее метод определения коэффициента Z — графический, также предложенный в [1]. Для определения коэффициента Z , согласно [1], необходимо вычислить следующие величины, рассчитанные в примере выше: $C_{\text{н}}$, C^* и $C_{\text{ст}}$.

В рассматриваемом примере пролива 40 л бензина названные величины таковы: $P_{\text{н}} = 35,7$ кПа; $C_{\text{н}} = 35,34$ %, $C_{\text{ст}} = 1,94$; $C^* = 3,68$.

В соответствии с [1], при $C_{\text{н}} > C^*$ величина $X = 1$, а коэффициент $Z = 0,3$.

Графический метод определения коэффициента Z не учитывает влияние размеров помещения на коэффициент Z . На него оказывают влияние только свойства паров ЛВЖ.

Влияние свойств паров ЛВЖ 40 веществ на коэффициент Z участия паров во взрыве показано в таблице. В ней представлены исходные данные физико-химических свойств этих веществ¹ [27, 28] и рассчитанные для них значения $C_{\text{н}}$, C^* , X , Z .

Из таблицы следует, что вещества делятся на три группы:

- вещества, имеющие расчетное значение параметра X менее 0,4, отношение $P_{\text{н}}/C_{\text{ст}} < 0,83$;
- вещества, имеющие расчетное значение параметра X от 0,4 до 1, отношение $P_{\text{н}}/C_{\text{ст}} > 0,83 < 2,08$;
- вещества, имеющие расчетное значение параметра X более 1, отношение $P_{\text{н}}/C_{\text{ст}} > 2,08$.

Вещества первой группы имеют коэффициент участия во взрыве, равный 0, в эту группу входят вещества, имеющие температуру вспышки $T_{\text{в}}$ более, чем максимальная температура воздуха для данной местности. Исключение составляет изопропилбензол ($T_{\text{в}} = 37$ °С) и н-бутиловый спирт ($T_{\text{в}} = 35$ °С).

Вещества второй группы имеют коэффициент участия во взрыве выше 0 до 0,299. Возможны случаи в этой группе, когда $Z > 0$, но $T_{\text{в}}$ превышает температуру окружающей среды. В этом случае коэффициент Z участия во взрыве, используемый в формуле для расчета давления взрыва, следует принимать равным 0.

Вещества третьей группы имеют Z , равный 0,3.

Из таблицы также следует, что параметр X уменьшается с понижением температуры вспышки.

Влияние свойств паров ЛВЖ на коэффициент участия во взрыве Z

The influence of the properties of LVH vapors on the coefficient of participation in the explosion

Наименование Type of highly flammable liquid	Брутто-формула Molecular formula	β	$C_{\text{ст}}$, % об. $C_{\text{ст},\text{с}}$, % vol.	$P_{\text{н}}$, кПа, при 37 °С $P_{\text{с},\text{н}}$, кПа at 37 °С	$C_{\text{н}}$ $C_{\text{с}}$	C^*	X	Z	$T_{\text{в}}$, °С T_{pos} , °С
н-Ундекан n-Undecane	$C_{11}H_{24}$	17	1,2	0,19	0,17	2,28	0,076	0	62
н-Амиловый спирт n-Amyl alcohol	$C_5H_{12}O$	7,5	2,68	0,65	0,59	5,09	0,116	0	48
N,N-Диметилформаамид N,N-Dimethylformamide	C_3H_7ON	4,25	4,64	1,03	0,94	8,82	0,107	0	53
Декан Decane	$C_{10}H_{22}$	15,5	1,32	0,48	0,44	2,51	0,175	0	47
Уксусная кислота Acetic acid	$C_2H_4O_2$	2	9,36	3,94	3,59	17,78	0,202	0	40
Этилцеллозольв Ethyl cellosolve	$C_4H_{10}O_2$	5,5	3,62	1,42	1,29	6,88	0,188	0	40

Наименование Type of highly flammable liquid	Брутто- формула Molecular formula	β	$C_{ст}$ % об. $C_{st,c}$ % vol.	P_n , кПа, при 37 °C $P_{s,y}$, kPa at 37 °C	C_n C_s	C^*	X	Z	T_B , °C T_{pos} , °C
н-Бутиловый спирт n-Butyl alcohol	$C_4H_{10}O$	6	3,33	2,03	1,85	6,33	0,293	0	35
γ-Пиколлин γ-Picoline	C_6H_7N	7,75	2,6	1,62	1,47	4,94	0,299	0	39
Амилацетат Amyl acetate	$C_7H_{14}O_2$	9,5	2,13	1,51	1,37	4,05	0,340	0	43
Изопропилбензол Isopropylbenzene	C_9H_{12}	12	1,69	1,23	1,12	3,21	0,349	0	37
Стирол Styrene	C_8H_8	10	2,02	1,77	1,61	3,84	0,421	0,035	30
н-Нонан n-Nonane	C_9H_{20}	14	1,45	1,25	1,14	2,76	0,414	0,03	31
о-Ксилол o-Xylene	C_8H_{10}	10,5	1,93	1,75	1,59	3,67	0,435	0,065	31
Хлорбензол Chlorobenzene	C_6H_5Cl	7	2,87	3,05	2,78	5,45	0,510	0,09	29
м-Ксилол m-Xylene	C_8H_{10}	10,5	1,93	2,16	1,97	3,67	0,537	0,13	28
Изобутиловый спирт Isobutyl alcohol	$C_4H_{10}O$	6	3,33	3,53	3,21	6,33	0,509	0,09	28
п-Ксилол p-Xylene	C_8H_{10}	10,5	1,93	2,27	2,07	3,67	0,565	0,16	26
Этилбензол Ethylbenzene	C_8H_{10}	10,5	1,93	2,47	2,25	3,67	0,614	0,17	20
н-Пропиловый спирт n-Propyl alcohol	C_3H_8O	4,5	4,39	5,73	5,21	8,34	0,627	0,175	23
Ксилол (смесь изомеров) Xylene (mixture of isomers)	C_8H_{10}	10,5	1,93	2,75	2,50	3,67	0,684	0,215	29
Пиридин Pyridine	C_5H_5N	6,25	3,2	5,0	4,55	6,08	0,750	0,24	20
Этиловый спирт Ethyl alcohol	C_2H_6O	3	6,44	15,0	13,65	12,24	1,12	0,3	13
1,2-Дихлорэтан 1,2-Dichloroethane	$C_2H_4Cl_2$	2,5	7,63	18,1	16,47	14,50	1,14	0,3	9
н-Октан n-Octane	C_8H_{18}	12,5	1,63	3,56	3,24	3,10	1,05	0,3	14
Метиловый спирт Methyl alcohol	CH_4O	1,5	12,1	30,3	27,6	23,0	1,20	0,3	6
1,4-Диоксан 1,4-Dioxane	$C_4H_8O_2$	5	3,97	9,28	8,44	7,54	1,12	0,3	11
Изопропиловый спирт Isopropyl alcohol	C_3H_8O	4,5	4,39	12,0	10,92	8,34	1,31	0,3	14
Толуол Toluene	C_7H_8	9	2,24	6,86	6,24	4,26	1,47	0,3	7
Метилпропилкетон Methylpropyl ketone	$C_5H_{10}O$	7	2,87	9,11	8,29	5,45	1,52	0,3	6
Сероуглерод Carbon disulfide	CS_2	3	6,44	74,2	67,5	12,24	5,53	0,3	-43

Наименование Type of highly flammable liquid	Брутто-формула Molecular formula	β	$C_{ст}$, % об. $C_{st,с}$, % vol.	P_H , кПа, при 37 °С $P_{s,37}$, kPa at 37 °С	C_H C_s	C^*	X	Z	$T_{в*}$, °С T_{pos} , °С
Этилацетат Ethyl acetate	$C_4H_8O_2$	4	4,91	22,0	20,0	9,33	2,15	0,3	–3
2,2,4-Триметилпентан 2.2.4-Trimethylpentane	C_8H_{18}	12,5	1,63	11,4	10,4	3,10	3,35	0,3	–4
Бензол Benzene	C_6H_6	7,5	2,68	21,4	19,5	5,09	3,83	0,3	–11
Тетрагидрофуран Tetrahydrofuran	C_4H_8O	5,5	3,62	35,7	32,5	6,88	4,73	0,3	–20
Циклогексан Cyclohexane	C_6H_{12}	9	2,44	21,23	19,3	4,64	4,18	0,3	–17
Ацетон Acetone	C_3H_6O	4,5	4,39	50,03	45,5	8,34	5,47	0,3	–18
н-Гексан n-Hexane	C_6H_{14}	9,5	2,13	33,18	30,2	4,05	7,48	0,3	–23
Диэтиламин Diethylamine	$C_4H_{11}N$	6,75	2,97	51,33	46,7	5,64	8,30	0,3	–14
Метилэтилкетон Methyl ethyl ketone	C_4H_8O	5,5	3,62	167,8	152,7	6,88	22,25	0,3	–6
Амилен Amylene	C_5H_{10}	7,5	2,68	128,4	116,8	5,09	23,00	0,3	–18

Обращает на себя внимание тот факт, что в расчетах принимался коэффициент избытка воздуха $\varphi = 1,9$. Однако этот коэффициент при горении в замкнутом пространстве (например, в помещении) не может принимать такое значение. Он существенно ниже, а при открытом пожаре он выше и может достигать значений 2–5.

В условиях пожара, когда горение протекает с естественным притоком воздуха, коэффициент избытка воздуха в большинстве случаев выше единицы и колеблется в широких пределах¹.

Сопоставляя формулы $C_H = 100 \cdot P_H/P_0$ и $C^* = \varphi C_{ст}$, становится ясно, что чем меньше коэффициент избытка воздуха φ , тем больше отношение $C_H/C^* = X$.

Если принять коэффициент $\varphi = 1,1$, то таблица изменится. При уменьшении коэффициента φ область веществ, имеющих X от 0,4 до 1, смещается вверх. Например, если при $\varphi = 1,9$ н-бутиловый спирт имеет коэффициент $Z = 0$ и может рассматриваться как взрывобезопасное вещество, то при $\varphi = 1,1$ н-бутиловый спирт имеет $Z = 0,085$ и наличие паров этого вещества в помещении следует учитывать при определении категории помещения. Чтобы избежать подобных ситуаций, представляется целесообразным при определении коэффициента Z графическим способом находить величину X как отношение $C_H/C_{ст} = 0,99P_H/C_{ст}$.

Выводы

Из представленного анализа методов определения коэффициента Z участия паров ЛВЖ во взрыве следует, что он может быть установлен тремя способами:

- табличным (по максимально возможному табличному значению);
- расчетным на основе характера распределения газов и паров в объеме помещения, однако при использовании расчетного метода велика вероятность ошибки, обусловленной многочисленными условиями применимости метода, возможно получение необъяснимого значения Z более 1. Кроме того, расчетный метод весьма трудоемкий. Для его применения необходимо уточнение условий, при которых он может быть использован;
- графическим, по графику зависимости Z от параметра X . Этот метод является наиболее простым и надежным.

При использовании графического метода определения коэффициента Z следует принимать коэффициент избытка окислителя равным близким к единице, параметр X следует рассчитывать по формуле $X = 0,99P_H/C_{ст}$.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Технический регламент о требованиях пожарной безопасности : Федеральный закон от 22.07.2008 № 123-ФЗ (ред. от 30.04.2021).
2. СП 12.13130.2009. Определение категорий помещений, зданий и наружных установок по взрывопожарной и пожарной опасности.
3. ОНТП 10-99. Нормы технологического проектирования для предприятий машиностроения. Определение категорий (классификация) помещений и зданий предприятий по взрывопожарной и пожарной опасности. Противопожарные требования.
4. НПБ 105-03. Определение категорий помещений, зданий и наружных установок по взрывопожарной и пожарной опасности.
5. ОНТП 24-86. Определение категорий помещений и зданий по взрывопожарной и пожарной опасности.
6. СНиП II-90-81. Производственные здания промышленных предприятий. Нормы проектирования.
7. СН 463-74. Указания по определению категории производств по взрывной, взрывопожарной и пожарной опасности.
8. СН 102-71. Противопожарные нормы строительного проектирования промышленных предприятий и населенных мест.
9. ОСТ 90 015-39. Общесоюзные нормы строительного проектирования промышленных предприятий.
10. Корольченко А.Я., Загорский Д.О. Категорирование помещений и зданий по взрывопожарной и пожарной опасности : учеб. пос. М. : Пожнаука, 2010. 118 с.
11. Пособие по применению СП 12.13130.2009. Определение категорий помещений, зданий и наружных установок по взрывопожарной и пожарной опасности.
12. Пособие по применению НПБ 105-03. Определение категорий помещений, зданий и наружных установок по взрывопожарной и пожарной опасности.
13. Хрунов В.А., Касаткина В.И. Категорирование помещений и зданий по взрывопожарной и пожарной опасности : метод. указ. Иваново : Ивановский ГПУ, 2016. 36 с.
14. Водиев П.П. Определение категорий помещений и зданий по взрывопожарной и пожарной опасности. Ульяновск : УВАУ ГАИ, 2009. 19 с.
15. Овчаренко А.Г., Смирнов В.В. Расчет критериев взрывопожарной и пожарной опасности производственных помещений. Бийск : АГТУ им. Ползунова И.И., 2019. 27 с.
16. Hou J., Liu Q. Theoretical models and experimental determination methods for equations of state of silicate melts: A review // *Science China Earth Sciences*. 2019. Vol. 62. Issue 5. Pp. 751–770. DOI: 10.1007/s11430-017-9325-3
17. Cui Z., Yan Y., Liu Q., Zhao X., Xu X., Liu F. et al. Accurate determination of low-dimensional materials' complex refractive index by cavity resonant method // *Optical Materials*. 2022. Vol. 131. P. 112682. DOI: 10.1016/j.optmat.2022.112682
18. Lang F.C., Xing Y.M., Zhao Y.R., Zhu J., Hou X.H., Zhang W.G. Experimental determination of the interface residual stresses of carbon-fiber-reinforced polymers // *Advanced Composite Materials*. 2020. Vol. 24(sup1). Pp. 33–47. DOI: 10.1080/09243046.2014.937136
19. Habib F., Tocher D.A., Press N.J., Carmal C.J. Structure determination of terpenes by the crystalline sponge method // *Microporous and Mesoporous Materials*. 2020. Vol. 308. P. 110548. DOI: 10.1016/j.micromeso.2020.110548
20. Lv Y., Liang J., Wang B., Zhang X., Yuan W., Li Y., Xie J. Effect of heat and moisture transfer on the growth of mould on the inner surface of walls: A case study in Dalian of China // *Building Simulation*. 2020. Issue 13. Issue 6. Pp. 1269–1279. DOI: 10.1007/s12273-014-0200-9
21. Баратов А.Н. Категорирование объектов по пожаровзрывоопасности // *Итоги науки и техники. Пожарная охрана : сб. науч. тр.* Т. 6. М. : ВИНТИ, 1985. С. 41–68.
22. Баратов А.Н., Пчелинцев В.А., Никонова Е.В. Совершенствование системы категорирования помещений и зданий по взрывопожарной и пожарной опасности // *Пожаровзрывобезопасность/Fire and Explosion Safety*. 2001. Т. 10. № 3. С. 25–27.
23. Земский Г.Т., Вогман Л.П., Масленников В.В., Зуйков В.А., Зенин В.А. Определение категории помещений по пожаровзрывоопасности, в которых обращаются взаймореагирующие вещества // *Пожаровзрывобезопасность/Fire and Explosion Safety*. 1993. № 4. С. 28–31.
24. Шебеко Ю.Н., Корольченко А.Я., Шевчук А.П. О принципе «максимального ожидаемого воздействия» при категорировании производственных помещений по взрывопожарной опасности // *Пожаровзрывобезопасность/Fire and Explosion Safety*. 1992. Т. 1. № 3. С. 46–48.
25. Васюков Г.В., Корольченко А.Я., Рубцов В.В. К вопросу о категорировании помещений для хранения и технического обслуживания газобаллонных автомобилей // *Пожаровзрывобезопасность/Fire and Explosion Safety*. 2006. Т. 15. № 1. С. 25–29.
26. Харламенков А.С. Категорирование помещений газовых котельных по взрывопожарной и пожарной опасности // *Пожаровзрывобезопасность/Fire and Explosion Safety*. 2018. № 27.

- № 11. С. 70–72. URL: <https://elibrary.ru/item.asp?id=36576465>
27. Вогман Л.П., Земский Г.Т., Зуиков В.А., Кондрачук Н.В., Зуиков А.В. Методологический подход к определению категорий по взрывопожарной и пожарной опасности помещений и наружных установок хранения фейерверочных изделий I–III классов опасности // Актуальные проблемы пожарной безопасности : мат. XXXI Междунар. науч.-практ. конф. Балашиха, 2019. С. 155–157. URL: <https://elibrary.ru/item.asp?id=38074288>
 28. Земский Г.Т., Зуиков В.А. О категорировании помещений с наличием летучих жидкостей // Пожарная безопасность. 2013. № 1. С. 39–45. URL: <https://elibrary.ru/item.asp?id=18875599>
 29. Пейсахов И.Л., Лютин Ф.Б. Атлас диаграмм и номограмм по газопылевой технике. М. : Металлургия, 1974. 116 с.
 30. Расчет основных показателей пожаровзрывоопасности веществ и материалов : руководство. М. : ВНИИПО МЧС России, 2002. 77 с.
 31. Корольченко А.Я., Корольченко Д.А. Пожаровзрывоопасность веществ и материалов и средства их тушения : справочник. М. : Пожнаука, 2004.
 32. Земский Г.Т. Физико-химические и огнеопасные свойства органических химических соединений : справочник. М. : ВНИИПО МЧС России, 2016. 971 с.
 33. Портола В.А., Луговцева Н.Ю., Торосян Е.С. Расчет процессов горения и взрыва : учеб. пос. Томск : Томского политехнического университета, 2012. 108 с.
 34. Смельков Г.И., Пехотилов В.А., Рябиков А.И., Назаров А.А. К вопросу о пожарной опасности аккумуляторных батарей // Безопасность труда в промышленности. 2020. Т. 5. С. 56–62. DOI: 10.24000/0409-2961-2020-5-56-62
 35. Nikulina Y., Shulga T., Sytnik A., Toropova O. System analysis of the process of determining the room category on explosion and fire hazard // Studies in Systems, Decision and Control. 2021. Vol. 337. Pp. 125–139. DOI: 10.1007/978-3-030-65283-8_11
 36. Shulga T., Nikulina Y. Decision support system for fire alarm design // Studies in Systems, Decision and Control. 2022. Vol. 416. Pp. 407–416. DOI: 10.1007/978-3-030-95112-2_33
 37. Glushkov D.O., Paushkina K.K., Pleshko A.O., Ysokomorny V.S. Characteristics of micro-explosive dispersion of gel fuel particles ignited in a high-temperature air medium // Fuel. 2022. Vol. 313. P. 123024. DOI: 10.1016/j.fuel.2021.123024
 38. Okamoto K., Ichikawa T., Fujimoto J., Kashiwagi N., Nakagawa M., Hagiwara T. et al. Prediction of evaporative diffusion behavior and explosion damage in gasoline leakage accidents // Process Safety and Environmental Protection. 2021. Vol. 148. Pp. 893–902. DOI: 10.1016/j.psep.2021.02.010
 39. Wang T., Zhou Y., Luo Z., Wen H., Zhao J., Su B. et al. Flammability limit behavior of methane with the addition of gaseous fuel at various relative humidities // Process Safety and Environmental Protection. 2020. Vol. 140. Pp. 178–189. DOI: 10.1016/j.psep.2020.05.005

REFERENCES

1. *Technical Regulations on fire safety requirements* : Federal Law No. 123-FZ of 22.07.2008 (as amended on 30.04.2021). (rus).
2. SP 12.13130.2009. *Determination of categories of premises, buildings and outdoor installations for explosion and fire hazards*. (rus).
3. ONTP 10-99. *Norms of technological design for mechanical engineering enterprises. Definition of categories (classification) of premises and buildings of enterprises for explosion and fire hazard. Fire protection requirements*. (rus).
4. NPB 105-03. *Determination of categories of premises, buildings and outdoor installations for explosion and fire hazards*. (rus).
5. ONTP 24-86. *Determination of categories of premises and buildings for explosion and fire hazard*. (rus).
6. SNiP II-90-81. *Industrial buildings of industrial enterprises. Design standards*. (rus).
7. CH 463-74. *Instructions for determining the category of production for explosive, explosion and fire hazard*. (rus).
8. CH 102-71. *Fire safety standards of construction design of industrial enterprises and populated areas*. (rus).
9. OST 90 015-39. *All-Union norms of construction design of industrial enterprises*. (rus).
10. Korolchenko A.Ya., Zagorsky D.O. *Categorization of premises and buildings by explosion and fire hazard : study guide*. Moscow, Pozhnauka Publ., 2010; 118. (rus).
11. Manual on the use of SP 12.13130.2009. *Determination of categories of premises, buildings and outdoor installations for explosion and fire hazards*. (rus).
12. Manual on the use of NPB 105-03. *Determination of categories of premises, buildings and outdoor installations for explosion and fire hazards*. (rus).
13. Khrunov V.A., Kasatkina V.I. *Categorization of premises and buildings by explosion and fire hazard : methodical instructions*. Ivanovo, Ivanovo GPU, 2016; 36. (rus).
14. Vodiev P.P. *Definition of categories of premises and buildings for explosion and fire hazard*. Ulyanovsk, UVAU GAI, 2009; 19. (rus).
15. Ovcharenko A.G., Smirnov V.V. *Calculation of criteria for explosion and fire hazard of industrial premises*. Biysk, AGTU im. Polzunova I.I., 2019; 27. (rus).
16. Hou J., Liu K. Theoretical models and experimental methods for determining the equations

- of state of silicate melts: Review. *Science China Earth Sciences*. 2019; 62(5):751-770. DOI: 10.1007/s11430-017-9325-3
17. Cui Z., Yan Y., Liu Q., Zhao X., Xu X., Liu F. et al. Precise determination of the complex refractive index of low-dimensional materials by the resonator resonance method. *Optical Materials*. 2022; 131:112682. DOI: 10.1016/j.optmat.2022.112682
 18. Lang F.K., Xing Y.M., Zhao Y.R., Zhu J., Hou H.H., Zhang U.G. Experimental determination of residual stresses at the interface of polymers reinforced with carbon fiber. *Composite Structures*. 2020; 24(sup1): 33-47. DOI: 10.1080/09243046.2014.937136
 19. Habib F., Tocher D.A., Press N.J., Karmal K.J. Determination of the structure of terpenes by the crystal sponge method. *Microporous and Mesoporous Materials*. 2020; 308:110548. DOI: 10.1016/j.micromeso.2020.110548
 20. Lv Yu., Liang J., Wang B., Zhang H., Yuan W., Li Yu. et al. Influence of heat transfer and moisture transfer on the growth of mold on the inner surface of walls: a case study in Dalian, China. *Modeling of Buildings*. 2020; 13(6):1269-1279. DOI: 10.1007/s12273-014-0200-9
 21. Baratov A.N. Categorization of objects by fire and explosion hazard. *Results of science and technology. Fire Protection : collection of scientific papers*. Vol. 6. Moscow, VINITI, 1985; 41-68. (rus).
 22. Baratov A.N., Pchelintsev V.A., Nikonova E.V. Improvement of the system of categorization of premises and buildings by explosion and fire hazard. *Pozharovzryvbezopasnost/Fire and Explosion Safety*. 2001; 10(3):25-27. (rus).
 23. Zemsky G.T., Vogman L.P., Maslennikov V.V., Zuikov V.A., Zenin V.A. Determination of the category of premises by fire and explosion hazard in which mutually reacting substances are handled. *Pozharovzryvbezopasnost/Fire and Explosion Safety*. 1993; 4:28-31. (rus).
 24. Shebeko Yu.N., Korolchenko A.Ya., Shevchuk A.P. On the principle of "maximum expected impact" when categorizing industrial premises by explosion and fire hazard. *Pozharovzryvbezopasnost/Fire and Explosion Safety*. 1992; 1(3):46-48. (rus).
 25. Vasyukov G.V., Korolchenko A.Ya., Rubtsov V.V. On the problem of categorization of premises for storage and technical service of gas-balloon fire automobiles. *Pozharovzryvbezopasnost/Fire and Explosion Safety*. 2006; 15(1):25-29. (rus).
 26. Kharlamenkov A.S. Categorization of gas boiler rooms on explosion and fire hazard. *Pozharovzryvbezopasnost/Fire and Explosion Safety*. 2018; 27(11):70-72. URL: <https://elibrary.ru/item.asp?id=36576465> (rus).
 27. Vogman L.P., Zemsky G.T., Zuikov V.A., Kondratyuk N.V., Zuikov A.V. Methodological approach to the definition of categories for explosion and fire hazard of premises and outdoor installations for the storage of fireworks of hazard classes I–III. *Actual Problems of Fire Safety : materials of the XXVI International Scientific and Practical Conference*. Balashikha, 2019; 155-157. URL: <https://elibrary.ru/item.asp?id=38074288> (rus).
 28. Zemsky G.T., Zuikov V.A. Classification of premises with the presence of volatile liquids. *Fire Safety*. 2013; 1:39-45. URL: <https://elibrary.ru/item.asp?id=18875599> (rus).
 29. Peisakhov I.L., Lyutin F.B. *Atlas of diagrams and nomograms for gas-dust technology*. Moscow, Metallurgiya Publ., 1974; 116. (rus).
 30. *Calculation of the main indicators of fire and explosion hazard of substances and materials : manual*. Moscow, VNIPO EMERCOM of Russia, 2002; 33. (rus).
 31. Korolchenko A.Ya., Korolchenko D.A. *Fire and explosion hazard of substances and materials and means of extinguishing them : reference*. Moscow, Pozhnauka Publ., 2004. (rus).
 32. Zemsky G.T. *Physico-chemical and flammable properties of organic chemical compounds : reference*. Moscow, VNIPO EMERCOM of Russia, 2016; 971. (rus).
 33. Portola V.A., Lugovtseva N.Yu., Torosyan E.S. *Calculation of combustion and explosion processes : study guide*. Tomsk, Publishing House of Tomsk Polytechnic University, 2012; 108. (rus).
 34. Smelkov G.I., Pekhotikov V.A., Ryabikov A.I., Nazarov A.A. To the issue of accumulator batteries fire safety. *Occupational Safety in Industry*. 2020; 5:56-62. DOI: 10.24000/0409-2961-2020-5-56-62 (rus).
 35. Nikulina Yu., Shulga T., Sytnik A., Toropova O. System analysis of the process of determining the category of premises for explosion and fire hazard. *Research in the Field of Systems, Decision-Making and Management*. 2021; 337:125-139. DOI: 10.1007/978-3-030-65283-8_11
 36. Shulga T., Nikulina Yu. Decision support system in the design of fire alarm systems. *Research in the Field of Systems, Decision-Making and Management*. 2022; 416:407-416. DOI: 10.1007/978-3-030-95112-2_33
 37. Glushkov D.O., Paushkina K.K., Pleshko A.O., Vysokogorny V.S. Characteristics of micro-explosive dispersion of gel fuel particles igniting in a high-temperature air environment. *Fuel*. 2022; 313:123024. DOI: 10.1016/j.fuel.2021.123024
 38. Okamoto K., Ichikawa T., Fujimoto J., Kashiwagi N., Nakagawa M., Hagiwara T. et al. Prediction of evaporative diffusion behavior and explosion damage in gasoline leakage accidents. *Process Safety and Environmental Protection*. 2021; 148:893-902. DOI: 10.1016/j.psep.2021.02.010
 39. Wang T., Zhou Yu., Luo Z., Wen H., Zhao J., Su B. et al. Behavior of the flammability limit of methane with the addition of gaseous fuel at different relative humidity. *Technological Safety and Environmental Protection*. 2020; 140:178-189. DOI: 10.1016/j.psep.2020.05.005

Поступила 27.06.2022, после доработки 20.07.2022;

принята к публикации 29.07.2022

Received June 27, 2022; Received in revised form July 20, 2022;

Accepted July 29, 2022

Информация об авторах

ЗЕМСКИЙ Геннадий Тимофеевич, канд. хим. наук, ведущий научный сотрудник, Всероссийский ордена «Знак Почета» научно-исследовательский институт противопожарной обороны Министерства Российской Федерации по делам гражданской обороны, чрезвычайным ситуациям и ликвидации последствий стихийных бедствий, Россия, 143903, Московская обл., г. Балашиха, мкр. ВНИИПО, 12; РИНЦ ID: 586840; e-mail: vniipo-3.5.3@ya.ru

ВОГМАН Леонид Петрович, д-р техн. наук, главный научный сотрудник, Всероссийский ордена «Знак Почета» научно-исследовательский институт противопожарной обороны Министерства Российской Федерации по делам гражданской обороны, чрезвычайным ситуациям и ликвидации последствий стихийных бедствий, Россия, 143903, Московская обл., г. Балашиха, мкр. ВНИИПО, 12; РИНЦ ID: 561474; e-mail: vniipo-3.5.3@ya.ru

КОНДРАТЮК Наталья Валентиновна, старший научный сотрудник, Всероссийский ордена «Знак Почета» научно-исследовательский институт противопожарной обороны Министерства Российской Федерации по делам гражданской обороны, чрезвычайным ситуациям и ликвидации последствий стихийных бедствий, Россия, 143903, Московская обл., г. Балашиха, мкр. ВНИИПО, 12; РИНЦ ID: 1126914; e-mail: vniipo-3.5.3@ya.ru

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

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

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Information about the authors

Gennadiy T. ZEMSKIY, Cand. Sci. (Chem.), Leading Researcher, All-Russian Research Institute for Fire Protection of Ministry of Russian Federation for Civil Defense, Emergencies and Elimination of Consequences of Natural Disasters, VNIPO, 12, Balashikha, Moscow Region, 143903, Russian Federation; ID RISC: 586840; e-mail: vniipo-3.5.3@ya.ru

Leonid P. VOGMAN, Dr. Sci. (Eng.), Chief Researcher, All-Russian Research Institute for Fire Protection of Ministry of Russian Federation for Civil Defense, Emergencies and Elimination of Consequences of Natural Disasters, VNIPO, 12, Balashikha, Moscow Region, 143903, Russian Federation; ID RISC: 561474; e-mail: vniipo-3.5.3@ya.ru

Natalya V. KONDRATYUK, Senior Researcher, All-Russian Research Institute for Fire Protection of Ministry of Russian Federation for Civil Defense, Emergencies and Elimination of Consequences of Natural Disasters, VNIPO, 12, Balashikha, Moscow Region, 143903, Russian Federation; ID RISC: 1126914; e-mail: vniipo-3.5.3@ya.ru

Dmitriy A. KOROLCHENKO, Dr. Sci. (Eng.), Head of Department of Integrated Safety in Civil Engineering, National Research Moscow State University of Civil Engineering, Moscow, Russian Federation; ID RISC: 352067; Scopus Author ID: 55946060600; Researcher ID: E-1862-2017; ORCID: 0000-0002-2361-6428; e-mail: KorolchenkoDA@mgsu.ru

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

The authors declare no conflicts of interests.

Исследование времени начала эвакуации людей в жилых многоэтажных зданиях без систем оповещения о пожаре

Дмитрий Александрович Самошин¹, Роман Николаевич Истратов¹,
Милена Михайловна Шаранова², Владимир Анатольевич Кочетыгов¹✉,
Сергей Витальевич Томин¹, Алексей Геннадьевич Фролов¹

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

² Специальная пожарно-спасательная часть № 14 Специального отдела № 6 Специального управления федеральной противопожарной службы № 3 Министерства Российской Федерации по делам гражданской обороны, чрезвычайным ситуациям и ликвидации последствий стихийных бедствий, Московская область, г. Химки, Россия

АННОТАЦИЯ

Введение. Согласно статистике, наибольшая гибель людей от пожаров в России происходит в жилых зданиях высотой не более 28 м. При этом большинство систем противопожарной защиты в них не предусматриваются. В частности, в жилых домах вышеуказанной высоты может отсутствовать система пожарной сигнализации. Реальные значения времени начала эвакуации ($t_{нэ}$) в таких зданиях неизвестны, поскольку отечественных исследований в них до настоящего времени не проводилось.

Цели и задачи. Целью работы было установление значений $t_{нэ}$ людей в жилом доме, не оборудованном системой пожарной сигнализации.

Основными задачами являются изучение времени оповещения жильцов о пожаре и исследование времени реакции людей на сигнал о пожаре.

Методы. Методом научного исследования в данной работе является натурный эксперимент. В первой серии экспериментов основное внимание уделялось времени оповещения — было исследовано, сколько времени потребуется, чтобы оповестить всех жильцов здания с помощью одного, двух и трех оповещающих. Вторая серия экспериментов была направлена на изучение времени реакции людей на сигнал о пожаре — определялось, сколько времени понадобится людям, чтобы начать эвакуацию из своих квартир.

Результаты и их обсуждение. Исследования показали, что средние значения времени оповещения девятиэтажного здания одним, двумя и тремя оповещающими составили 20,0, 11,6 и 7,2 мин соответственно. На основе полученных данных была построена математическая модель, позволяющая спрогнозировать оптимальное количество оповещающих в зависимости от этажности здания.

Исследования времени реакции людей на сигнал о пожаре показали, что в дневное время в среднем людям требуется меньше времени на осознание и подготовку к эвакуации (72 с), чем в ночное (112 с).

Объединение полученных результатов позволило определить оптимальное количество оповещающих для проведения оповещения всех людей в жилом здании.

Выводы. Сравнение экспериментальных значений $t_{нэ}$ с данными действующей Методики расчета пожарного риска для девятиэтажного дома показало расхождение в 2,6 раза.

Ключевые слова: подготовка к эвакуации; система пожарной сигнализации; поведение людей; время оповещения о пожаре; этаж

Для цитирования: Самошин Д.А., Истратов Р.Н., Шаранова М.М., Кочетыгов В.А., Томин С.В., Фролов А.Г. Исследование времени начала эвакуации людей в жилых многоэтажных зданиях без систем оповещения о пожаре // Пожаровзрывобезопасность/Fire and Explosion Safety. 2022. Т. 31. № 4. С. 38–55. DOI: 10.22227/0869-7493.2022.31.04.38-55

✉ Кочетыгов Владимир Анатольевич, e-mail: kochetygov65@mail.ru

Researches of the pre-evacuation time of people in residential multi-storey buildings without fire warning systems

Dmitriy A. Samoshin¹, Roman N. Istratov¹, Milena M. Sharanova²,
Vladimir A. Kochetygov¹✉, Sergey V. Tomin¹, Aleksey G. Frolov¹

¹ The State Fire Academy of the Ministry of Russian Federation for Civil Defense, Emergencies and Elimination on Consequences of Natural Disasters, Moscow, Russian Federation

² Special Fire and Rescue Department No. 14 of the Special Department No. 6 of the Special Directorate of the Federal Fire Service No. 3 of the Ministry of Russian Federation for Civil Defense, Emergencies and Elimination on Consequences of Natural Disasters, Khimki, Moscow Region, Russian Federation

ABSTRACT

Introduction. According to statistics, the greatest loss of life from fires in Russia occurs in residential buildings with a height up to 28 m. At the same time, most fire protection systems are not provided in such type of buildings. In particular, in residential buildings of mentioned above height fire alarm system maybe not. That is why the real values of the pre-evacuation time (PET) in the buildings are not known, because domestic research still has not been conducted.

Goals and objectives. The aim of the work was to establish the values of the PET of people in a residential building that is not equipped with a fire alarm system.

The main tasks were to study the time to warn building occupants about a fire and to research the time of people's reaction to a fire warning.

Methods. The method of scientific research in this work is a full-scale experiment. In the first set of experiments focus were on warning time — it was investigated how much time it took to warn all building occupants by 1, 2 and 3 notifiers. The second set of experiments were aimed to study of people's reaction time to a fire alarm — it was determined how long it took to start evacuating from their apartments.

Results and their discussion. Studies have shown that the value of the alert time of a nine-storey building by one, two and three notifiers averaged was 20.0, 11.6 and 7.2 min, respectively. Based on the data obtained, a mathematical model was built that allows predicting the optimal number of notifiers depending on the number of storeys in the building. Studies of people's reaction time to a fire alarm have shown that during the daytime, on average, people need less time to realize and prepare for evacuation (72 s) than at night (112 s). Combining the results obtained allowed us to determine the optimal number of notifiers to warn all people in residential building.

Conclusion. Comparison of the experimental values of the PET with the data of the current Methodology of fire risk calculation for a nine-storey house showed a discrepancy of 2.6 times.

Keywords: preparation for evacuation; fire alarm system; human behavior; fire warning time; storey

For citation: Samoshin D.A., Istratov R.N., Sharanova M.M., Kochetygov V.A., Tomin S.V., Frolov A.G. Researches of the pre-evacuation time of people in residential multi-storey buildings without fire warning systems. *Pozharovzryvo-bezopasnost/Fire and Explosion Safety*. 2022; 31(4):38-55. DOI: 10.22227/0869-7493.2022.31.04.38-55 (rus).

✉ Vladimir Anatolyevich Kochetygov, e-mail: kochetygov65@mail.ru

Введение

Здания жилого назначения в нашей стране входят в число объектов с наибольшим количеством пожаров и являются абсолютным лидером по числу ежегодной гибели людей. Смертность людей, приходящаяся на жилые здания, составляет около 90 % от общего числа погибших при пожарах¹. Причем, чем ниже этажность зданий — тем выше в них гибель людей (рис. 1).

Более высокие статистические показатели гибели людей в зданиях с небольшим количеством этажей определяются структурой отечественного жилого фонда, тяготеющего к малоэтажному строительству, в котором преобладают жилые дома до 10 этажей.

Необходимо также отметить слабую защищенность таких зданий системами противопожарной защиты, в частности техническими средствами пожарной автоматики, по сравнению, например, со зданиями повышенной этажности, имеющими высоту более 28 м.

Так, оснащение жилых зданий системой пожарной сигнализации (СПС) независимо от этажности стало обязательным только с 1 марта 2021 г. со вступ-



Рис. 1. Количество погибших людей при пожаре в жилых зданиях до 10 этажей и от 10 этажей и выше в 2021 году [1]

Fig. 1. The number of people deceased in a fire in residential buildings up to 10 floors and from 10 floors and above in 2021 [1]

лением в силу сводов правил СП 484.1311500.2020² и СП 486.1311500.2020³. В период действия СП 5.13130.2009⁴ устройство СПС было необходимым только при высоте жилых зданий более 28 м.

¹ Пожары и пожарная безопасность в 2021 году : стат. сб. Балашиха : ФГБУ ВНИИПО МЧС России, 2022. 114 с.

² СП 484.1311500.2020. Системы противопожарной защиты. Системы пожарной сигнализации и автоматизация систем противопожарной защиты : утв. Приказом МЧС России от 31.07.2020 № 582, введен в действие с 01.03.2021.

³ СП 486.1311500.2020. Системы противопожарной защиты. Перечень зданий, сооружений, помещений и оборудования, подлежащих защите автоматическими установками пожаротушения и системами пожарной сигнализации. Требования пожарной безопасности : утв. Приказом МЧС России от 20.07.2020 № 539, введен в действие с 01.03.2021.

⁴ СП 5.13130.2009. Системы противопожарной защиты. Установки пожарной сигнализации и пожаротушения автоматические. Нормы и правила проектирования : утв. Приказом МЧС России от 25.03.2009 № 175, введен в действие с 01.05.2009,

По новым требованиям квартиры рекомендуется оснащать автоматическими дымовыми пожарными извещателями СПС. При их отсутствии необходимо применять автономные пожарные извещатели вне зависимости от этажности здания, в том числе в одно-квартирных жилых домах (включая блокированные).

Устройство системы оповещения и управления эвакуацией людей при пожаре (СОУЭ) согласно СП 3.13130.2009⁵ требуется без каких-либо исключений только для жилых зданий коридорного типа, тогда как для жилых зданий секционного типа необходимость оборудования СОУЭ наступает при наличии 11 и более этажей.

Оснащение квартир автономными пожарными извещателями, как предлагается в нормативных документах^{2, 3}, позволит оповестить людей лишь в квартире с очагом пожара, а не этажа или здания в целом, поэтому полноценной системой оповещения это считать нельзя.

Предусматривать мероприятия по противодымной защите (ПДЗ) в виде устройства системы дымоудаления и незадымляемых лестничных клеток согласно СП 7.13130.2013⁶ следует в жилых зданиях выше 28 м. А предусматривать автоматические установки пожаротушения (АУП) в жилых зданиях, согласно СП 485.1311500.2020⁷, требуется при их высоте более 75 м.

Таблица 1. Значение времени начала эвакуации людей и оснащение системами пожарной автоматики в жилых зданиях с различной этажностью и типом планировки

Table 1. The value of the time of the pre-evacuation time of people and the equipment of fire automation systems in residential buildings with different floors and type of layout

Этажность жилых зданий, этаж Number of storeys of residential buildings, floor	Тип планировки Type of layout	Системы пожарной автоматики Automatic fire systems				Значение времени начала эвакуации людей по Методике ⁸ , мин The value of the pre-evacuation time of people according to the Methodology of fire risk calculation ⁸ , min
		СПС Fire alarm system	СОУЭ System of annunciation and management of human evacuation at fire	ПДЗ Smoke protection system	АУП Automatic fire-extinguishing system	
1–9	Секционная Sectional	+	–	–	–	9
	Коридорная Corridor	+	+	–	–	6
10	Секционная Sectional	+	–	+	–	9
	Коридорная Corridor	+	+	+	–	6
11–25	Секционная Sectional	+	+	+	–	6
	Коридорная Corridor	+	+	+	–	4
26 и более 26 and more	Секционная Sectional	+	+	+	+	4
	Коридорная Corridor	+	+	+	+	4

Примечание: (+) — требуется; (–) — не требуется

Note: (+) — required; (–) — not required

утратил силу 16.02.2021.

⁵ СП 3.13130.2009. Системы противопожарной защиты. Система оповещения и управления эвакуацией людей при пожаре. Требования пожарной безопасности : утв. Приказом МЧС России от 25.03.2009 № 173, введен в действие с 01.05.2009.

⁶ СП 7.13130.2013. Отопление, вентиляция и кондиционирование. Требования пожарной безопасности : утв. и введен в действие Приказом МЧС России от 21.02.2013 № 116.

⁷ СП 485.1311500.2020. Системы противопожарной защиты. Установки пожаротушения автоматические. Нормы и правила проектирования : утв. Приказом МЧС России от 31.08.2020 № 628, введен в действие с 01.03.2021.

Сводная информация о необходимости оснащения жилых зданий различной этажности системами пожарной автоматики приведена в табл. 1, где также указаны тип планировки и время начала эвакуации.

Значения времени начала эвакуации в табл. 1 взяты в зависимости от наличия и типа СОУЭ, требующихся в жилых зданиях согласно Методике⁸, утвержденной Приказом МЧС России от 30.06.2009 № 382.

Для жилых секционных зданий с количеством этажей менее 11, в которых, как правило, отсутствует СОУЭ, время начала эвакуации составляет максимальное по Методике⁸ значение — 9 мин. При этом в коридорных зданиях, где предусматривается СОУЭ 2-го типа, время начала эвакуации составляет 6 мин.

Значение времени начала эвакуации в секционных жилых зданиях уменьшается до 6 мин при увеличении этажности от 11 до 25 этажей. В этом случае согласно требованиям СП 3.13130.2009⁵ в них предусматривается СОУЭ 1-го типа. При аналогичной этажности зданий коридорного типа, где уже требуется устройство СОУЭ 3-го типа, время начала эвакуации составляет 4 мин. В зданиях свыше 26 этажей, которые, как правило, проектируются по специальным техническим условиям, время начала эвакуации составляет минимальное по Методике⁸ значение — 4 мин, поскольку предусмотренный в них тип СОУЭ не ниже 3-го.

Таким образом, многоэтажные секционные жилые здания высотой не более 28 м в меньшей степени оснащены системами пожарной автоматики и имеют наибольшее время начала эвакуации, а соответственно, и большее количество жертв при пожарах, что подтверждается ранее приведенными статистическими данными¹. Причем чаще всего смерть людей наступает в результате отравления токсичными продуктами горения, и основным условием, способствующим этому, является несвоевременная эвакуация.

Нередко люди оказываются отрезанными от выходов опасными факторами пожара и, пытаясь спастись через окно, срываются или выпрыгивают с большой высоты. Так произошло 21 июля 2021 г. при пожаре в жилом многоквартирном доме города Санкт-Петербурга. Женщина попыталась укрыться от пожара, повиснув на подоконнике 6-го этажа, но, не удержавшись, упала вниз. От полученных травм она скончалась на месте, о чем сообщает информаци-

онный сайт Мегapolis⁹. Согласно данным сайта EAOMedia.ru¹⁰, похожий случай произошел 28 октября 2020 г. при пожаре в жилом доме села Ленинское Еврейской автономной области. 12-летняя девочка выпрыгнула из окна горящей квартиры, расположенной на третьем этаже жилого дома. В результате падения ребенок получил серьезные травмы позвоночника.

Подобные случаи являются результатом упущенного времени для своевременной эвакуации по причине отсутствия информации или позднего оповещения о возникновении пожара. То есть фактическое время эвакуации людей превысило время наступления критических значений опасных факторов пожара на путях эвакуации ($t_3 > t_{6л}$).

В настоящей статье авторы описывают проводимые ими экспериментальные исследования в жилом здании, не оборудованном системой пожарной сигнализации и системой оповещения и управления эвакуацией людей при пожаре, для определения времени оповещения жильцов о пожаре при разном числе оповещающих, а также времени реагирования людей при получении информации об опасности.

Целью статьи является определение на основе результатов проведенных экспериментов в вышеупомянутом жилом здании реальных значений времени начала эвакуации людей и сравнение их с данными действующей Методики⁸.

Аналитический обзор ранее проведенных исследований

Время начала эвакуации может достигать до 90 % времени всей эвакуации людей [1], влияя на ее своевременность и беспрепятственность.

Изучение времени начала эвакуации неразрывно связано с исследованиями поведения людей при пожаре, которые берут свое начало в 50-х гг. прошлого века. Одним из первых таких исследований является работа ученого из США Дж.Л. Брайана [2], изучившего отчеты людей, ставших очевидцами паники во время пожара 29 января 1956 г. в Арундел-Парк-холле в Бруклине штата Мэриленд, США. Продолжение и серьезное развитие данных исследований было осуществлено в начале 70-х гг. английским ученым П. Вудом в Великобритании [3]. П. Вуд проанализировал особенности поведения людей при воз-

⁸ Методика определения расчетных величин пожарного риска в зданиях, сооружениях и пожарных отсеках различных классов функциональной пожарной опасности (в редакции от 02.12.2015) : утв. Приказом МЧС России от 30.06.2009 № 382, начало действия редакции — 15.01.2016.

⁹ Мегapolis. Городская сеть информирования и взаимопомощи. Женщина погибла, прыгнув из окна во время пожара на Дыбенко. Момент падения попал на видео. URL: <https://megapolisonline.ru/zhenshina-pogibla-prygnuv-iz-okna-vo-vremya-pozhara-na-dybenko-moment-padeniya-popal-na-video/>

¹⁰ EAOMedia.ru. Ребенок выпрыгнул из окна горящей квартиры и травмировал позвоночник в ЕАО. URL: <https://eaomedia.ru/news/1015382/?from=34>

никновении пожара во множестве зданий различного назначения. Данные собирались на основе опроса людей после пожара по специальной анкете.

Из обобщения результатов анкетных опросов известно, что в жилых зданиях зафиксировано наибольшее количество людей, которые к первым действиям приступили сами и организовали окружающих для эвакуации из здания. Отмечается наименьшее количество людей, которые пытались тушить пожар (по всей видимости, из-за отсутствия первичных средств пожаротушения). Обращает на себя внимание высокий процент людей, которые при обнаружении пожара пытались собрать больше информации о пожаре для принятия наиболее оптимального решения о своем дальнейшем поведении.

Последующие действия являлись определенным отголоском того, что делали люди на первом этапе. Как правило, в случае сбора дополнитель-

ной информации следующим действием было либо звонок в пожарную охрану, либо борьба с пожаром. Если сначала был звонок в пожарную охрану, то далее предпринимались попытки тушения пожара. В том случае, когда предпринимались попытки тушения пожара, то далее следовал звонок в пожарную охрану. В ряде случаев, после оповещения пожарной охраны и окружающих людей, далее попытки тушить пожар не предпринимались и люди приступали к эвакуации из здания.

Более подробно последовательность действий при обнаружении пожара проживающих в жилых зданиях приведена на рис. 2.

В дальнейшем изучение времени начала эвакуации получило широкое распространение, и в поле зрения ученых попали отдельные факторы, определяющие его величину. Установленные факторы можно условно разделить на две группы: устойчи-

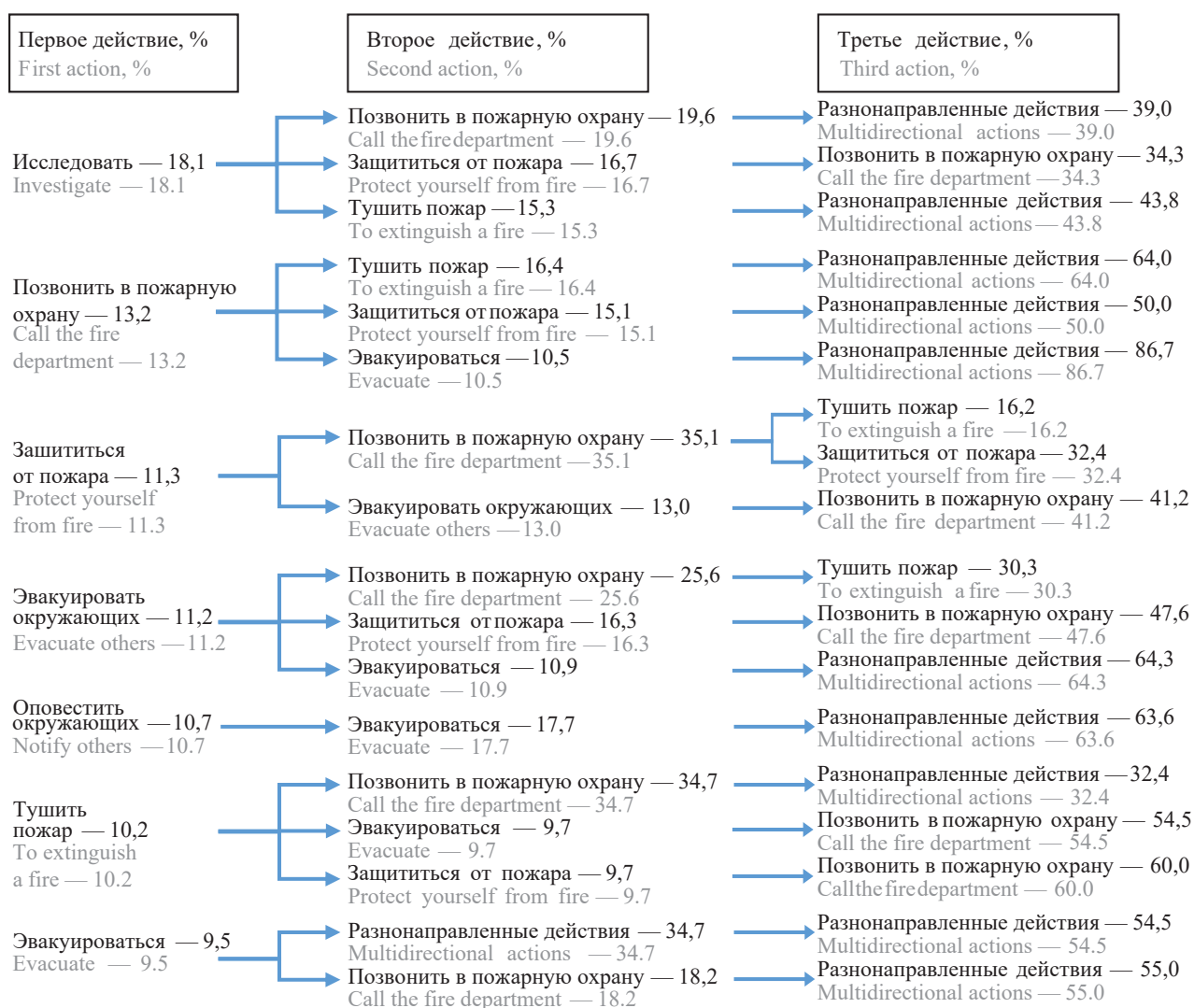


Рис. 2. Последовательность действий людей при обнаружении пожара в жилых зданиях (на основе опроса 1155 человек)

Fig. 2. The sequence of actions of people when a fire is detected in residential buildings (based on a survey of 1,155 people)

вые факторы (пол, возраст [4–6], темперамент [7], физические ограничения [8–11]) и временные факторы (сон/бодрствование [12], усталость, стресс [7]), а также ряд дополнительных обстоятельств:

- действия персонала [12, 13];
- динамика ОФП [14, 15];
- социальные и родственные связи человека [16, 17];
- противопожарная подготовка и обучение [18, 19];
- использование для эвакуации лифта [20, 21].

Довольно интересные данные времени начала эвакуации в жилых зданиях приведены в работах [22–24] и обобщены в работе [25]. Для удобства анализа этих данных на рис. 3 приведена диаграмма, обобщающая их средние и максимальные значения.

Значения времени начала эвакуации в жилых зданиях, приведенные на рис. 3, весьма высоки и в несколько раз отличаются от значений, полученных в зданиях иного функционального назначения, например офисных [26, 27], торговых [28], библиотеках [29], театрах [30], медицинских учреждениях [31] и т.д.

Высокие показатели времени начала эвакуации в жилых зданиях по сравнению со зданиями другого назначения отмечаются в работе [32]. А в работе [33] сообщается, что при реальном пожаре $t_{нз}$ последних жильцов жилого дома вообще превысило 3 часа.

Среди отечественных исследований можно выделить работы, посвященные методологическим проблемам нормирования времени начала эвакуации [34, 35], влиянию систем пожарной автоматики на безопасность людей [36–39], определению време-

ни начала эвакуации в детских садах [40], медицинских и социальных учреждениях [41–44], культовых зданиях [45], административных зданиях [46], жилых зданиях республики Вьетнам [58].

По данным, полученным для жилых зданий в г. Ханой [43], распределения значений времени реакции и подготовки людей к эвакуации и движения в пределах квартир отмечается характерными двумя пиковыми значениями (рис. 4).

Дальнейший анализ данных показал, что характерная форма гистограммы обусловлена численностью семей, среди которых можно выделить две характерные группы: молодую семью (из 2 членов) и сформировавшуюся семью (из 3 членов и более). Подготовка к эвакуации молодой семьи составляет около 2 мин, а сформировавшейся семьи, включающей пожилых людей, почти 5 мин (рис. 5 и 6).

Затраты времени на этапе подготовки к эвакуации связаны с выполнением тех или иных действий, направленных на защиту от пожара. Пример таких действий был описан ранее и отображен на рис. 2 и 3.

Приведенные данные по исследованию времени начала эвакуации в жилых домах показывают существенный разброс значений, более того, все они получены в зданиях с наличием и исправным состоянием системы оповещения. Кроме того, все эти значения получены в другой стране. Время начала эвакуации для зданий, в которых системы оповещения нет, до настоящего времени не исследовано.

В общем виде время начала эвакуации определяется суммой следующих основных составляющих [34]:

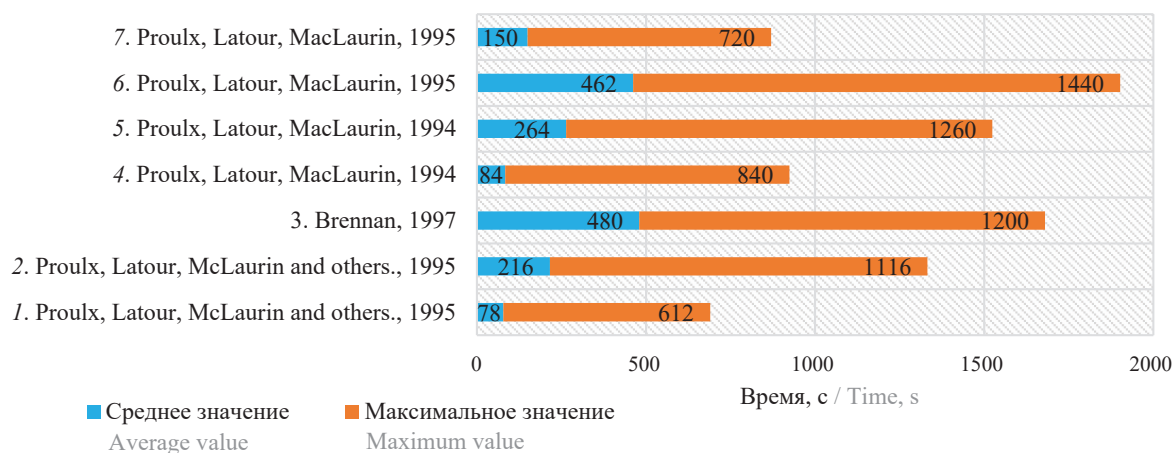


Рис. 3. Результаты исследования времени начала эвакуации людей в жилых зданиях, полученные зарубежными авторами: 1 — здание повышенной этажности (неанонсированные учения по эвакуации; срабатывание sireны пожарной сигнализации); 2 — здание повышенной этажности (неанонсированные учения по эвакуации; срабатывание sireны пожарной сигнализации; сильный снегопад во время учений); 3 — здание повышенной этажности (пожар, произошедший рано утром, сработала пожарная сигнализация, эвакуировано менее половины жильцов); 4–7 — многоэтажное здание (неанонсированные учения по эвакуации; срабатывание sireны пожарной сигнализации)

Fig. 3. The results of the study of the pre-evacuation time of people in residential buildings obtained by foreign authors: 1 — a high-rise building (unannounced evacuation exercises; fire alarm siren); 2 — a high-rise building (unannounced evacuation exercises; fire alarm siren; heavy snowfall during the exercises); 3 — a high-rise building (a fire that occurred early in the morning, the fire alarm went off, less than half of the residents were evacuated); 4–7 — multi-storey building (unannounced evacuation exercises; fire alarm siren)

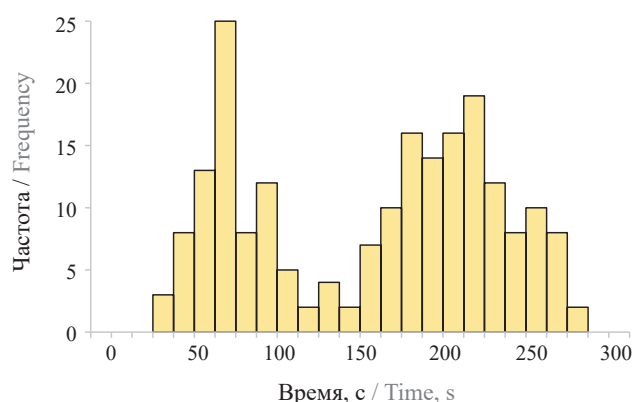


Рис. 4. Гистограмма распределения времени реакции, подготовки людей к эвакуации и движения в пределах квартир в жилых зданиях в г. Ханой [43]

Fig. 4. Histogram of the distribution of reaction time, preparation of people for evacuation and movement within apartments in residential buildings in Hanoi [43]

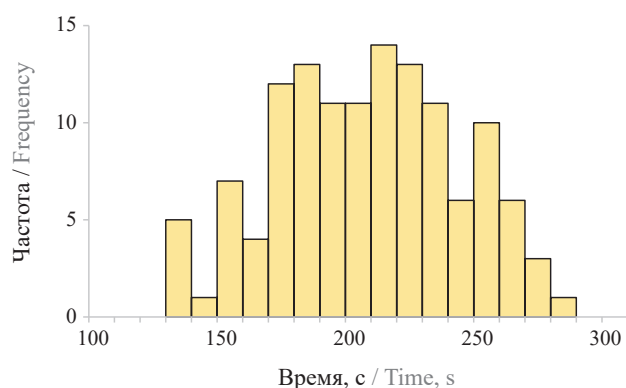


Рис. 5. Гистограммы распределения времени реакции и подготовки к эвакуации людей в семьях из 3 и более человек, проживающих в жилых зданиях в г. Ханой [43]

Fig. 5. Histograms of the distribution of reaction time and preparation for evacuation of people in families of 3 or more people living in residential buildings in Hanoi [43]

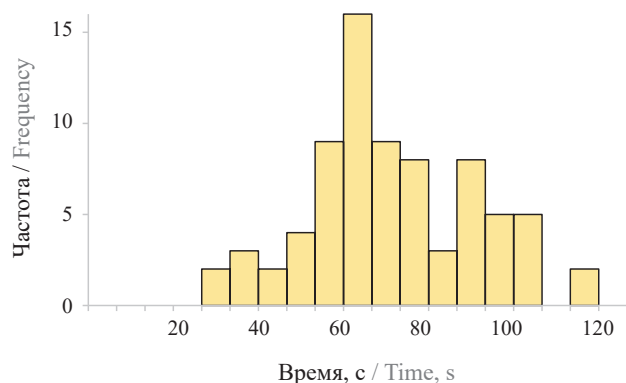


Рис. 6. Гистограммы распределения времени реакции и подготовки к эвакуации людей в молодых семьях из 1–2 человек, проживающих в жилых зданиях в г. Ханой [43]

Fig. 6. Histograms of the distribution of reaction time and preparation for evacuation of people in young families of 1–2 people living in residential buildings in Hanoi [43]

$$t_{н.э} = t_{об} + t_{оп} + t_o + t_{под}, \text{ с}, \quad (1)$$

где $t_{об}$ — время обнаружения очага горения, с;

$t_{оп}$ — время оповещения, объявления тревоги, с;

t_o — интервал времени, необходимый человеку для осознания информации и оценки сложившейся ситуации, с;

$t_{под}$ — время, необходимое для подготовки к эвакуации или для защиты помещения от воздействия опасных факторов пожара (ОФП), с.

Сумма слагаемых $t_{об} + t_{оп}$ является технической составляющей формирования времени начала эвакуации, зависящей от функционирования элементов систем обнаружения пожара и системы оповещения и управления эвакуацией. Данное выражение представляет собой общее время инерционности систем противопожарной защиты и при отсутствии паспортных данных на оборудование может приниматься равным 1 мин, при этом в здании необходимо наличие и функционирование систем пожарной автоматики. В жилых зданиях, где отсутствуют системы пожарной автоматики, значение этой величины не определено и является первым этапом исследования в настоящей статье.

Сумма $t_o + t_{под}$ определяет промежуток времени от получения сигнала о пожаре до начала движения к выходам из здания и характеризуется психоэмоциональным и физическим состоянием человека, а также уровнем его подготовки к действиям при пожаре. Значение этого интервала времени в отечественных жилых зданиях также не изучалось и будет рассмотрено во второй части настоящей статьи.

Материалы и методы исследования

С целью исследования времени начала эвакуации людей в жилом здании без системы оповещения о пожаре авторами был организован ряд специальных экспериментов. Эксперименты по исследованию времени оповещения людей о пожаре проводились в дневное время в одной из секций жилого девятиэтажного здания, необорудованного СПС и СОУЭ.

Замысел исследований заключался в том, что в одной из квартир возникает пожар и ее постояльцы самостоятельно проводят оповещение жильцов, проживающих в других квартирах на разных этажах. Всего было организовано 18 экспериментов, включающих 6 различных сценариев, повторяющихся по 3 раза с одним, двумя и тремя оповещающими людьми.

При оповещении учитывались затраты времени на движение по этажным внеквартирным коридорам и лестнице, стук в двери, ожидание открытия жильцами квартир и оповещение о необходимости начать эвакуацию. В процессе эксперимента велась видеозапись.

Значение времени обнаружения очага горения в экспериментах принимается $t_{об} = 0$, так как оповещающие люди на момент начала эксперимента находятся в квартире и, соответственно, являются свидетелями начала пожара. Время, которое могло быть потрачено на попытку тушения очага пожара, сбор документов или совершение звонка в пожарную охрану, в работе не рассматривалось. Значение $t_{оп}$ определялось временем от начала движения оповещающих из квартиры, где условно был обнаружен пожар, до оповещения жильцов последней квартиры (всего в пределах секции насчитывалось 36 квартир).

В зависимости от выбора размещения квартиры с очагом пожара для экспериментов были разработаны два сценария оповещения (пессимистичный и оптимистичный) с соответствующими им маршрутами движения оповещающих людей.

Сценарий 1. Оповещение снизу вверх (очаг пожара располагается в квартире на первом этаже; обнаруживший пожар человек оповещает каждую квартиру соседей вышележащих этажей; оповестив

последнюю квартиру верхнего этажа оповещающий выходит из здания) (рис. 7, *a*).

Сценарий 2. Оповещение сверху вниз (очаг пожара располагается в квартире на верхнем жилом этаже; оповещение происходит по ходу движения вниз) (рис. 7, *b*).

Если в качестве оповещающего был задействован один человек, то он начинал оповещать поочередно каждую квартиру на этаже, после чего переходил на следующий этаж. При двух оповещающих участники делили все этажи на две равные части с одинаковым количеством квартир, проводя оповещение каждый в своей зоне. При наличии команды из трех оповещающих участники делили здание на три зоны, состоящие из трех этажей индивидуально на каждого оповещающего. На рис. 8 представлены типовые схемы оповещения жильцов в разных ситуациях, когда в роли оповещающих находятся от одного до трех человек.

Стоит отметить, что в качестве оповещающих участвовали молодые люди в хорошей физической форме без каких-либо ограничений мобильности. Движение между этажами осуществлялось



Рис. 7. Схема оповещения жителей о пожаре в пределах секции жилого дома: *a* — согласно первому сценарию; *b* — согласно второму сценарию

Fig. 7. The scheme of notifying residents about a fire within a section of a residential building: *a* — according to the first scenario; *b* — according to the second scenario

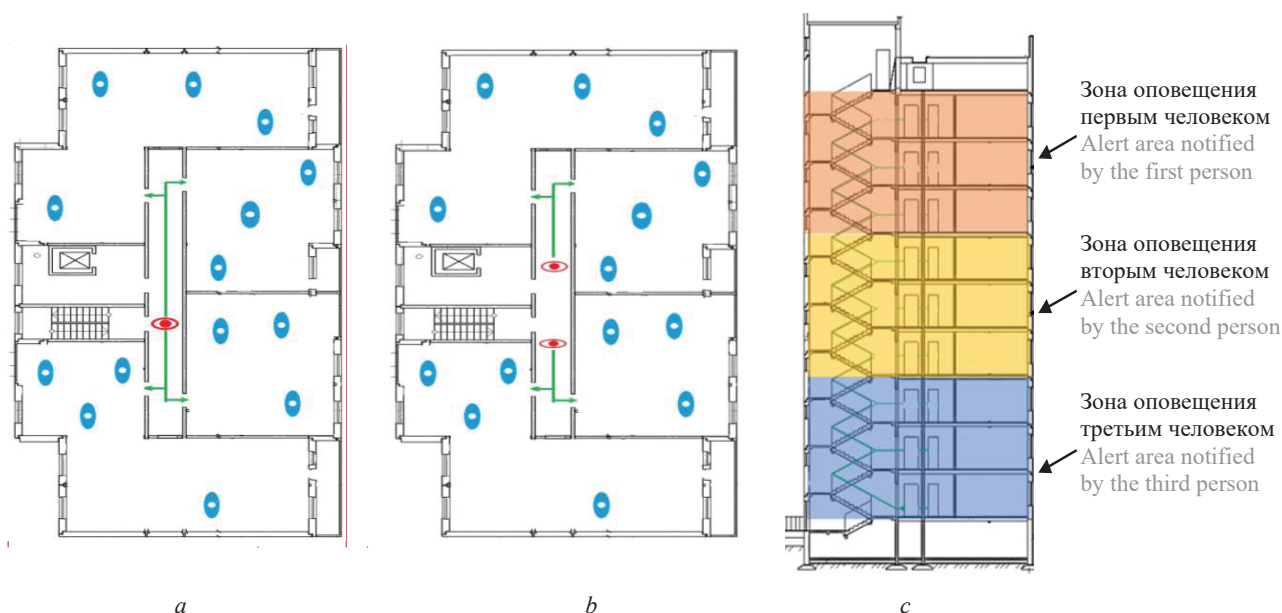


Рис. 8. Схема осуществления оповещения жителей дома о пожаре в пределах секции в зависимости от количества оповещающих: *a* — один оповещающий; *b* — два оповещающих; *c* — три оповещающих; — направление движения; — очевидец пожара; — жители дома

Fig. 8. Scheme for notifying residents of a house about a fire within a section, depending on the number of notifiers: *a* — one notifier; *b* — two notifiers; *c* — three notifiers; — surfacing motion; — eyewitness of the fire; — residents of the house

исключительно по лестничной клетке, так как при пожаре использование лифта в качестве средства передвижения запрещено.

Описанный выше эксперимент рассматривает время проведения оповещения людей о начавшемся пожаре, однако не учитывает важного критерия, связанного с поведением людей, а именно времени их реагирования на опасность. Без оценки этого слагаемого невозможно оценить такой ключевой параметр процесса эвакуации людей, как время начала эвакуации.

Исследование времени реакции людей на сигнал о пожаре (т.е. времени, затраченного на осознание и подготовку людей к эвакуации) проводилось в жилом девятиэтажном здании. Эксперименты были организованы как в дневное время суток, когда большинство жильцов в квартирах находятся в бодрствующем состоянии, так и в ночное время, когда все люди пребывают в состоянии сна — в наиболее уязвимом состоянии человека в случае пожара.

Сигналом о возникновении пожара служил звук сирены и речевое оповещение, воспроизводимые с пожарного автомобиля, предварительно припаркованного у фасада здания организаторами эксперимента.

Перед подачей сигнала тревоги в жилом доме заранее выбирались секции, в которых проживает наибольшее количество людей различного возраста и мобильности.

Далее выбирались места для расстановки видеозаписывающих устройств — миниатюрных видеокамер, которые производили съемку эксперимента.

Идеальным местом для размещения видеокамер являются жилые помещения, в которых можно было бы запечатлеть все особенности поведения людей при получении сигнала о пожаре. Однако у организаторов эксперимента такой возможности не было, и камеры были установлены в коридорах, фиксируя время выхода людей из квартир для дальнейшей эвакуации по лестнице. По окончании экспериментов отснятый видеоматериал анализировался методами математической статистики.

Результаты и их обсуждение

Экспериментальные замеры показали, что время оповещения одной квартиры в среднем составляет 28 с. На осуществление звонка/стука в дверь квартиры уходит около 3 с. Интервал времени, необходимый жильцам для открывания входной двери в квартиру, в среднем равен 17 с (это время, затраченное на осознание услышанного стука/звонка, движения до двери и ее открывания). Длительность речи занимала около 8 с: «В квартире на первом/девятом этаже произошел пожар! Требуется эвакуация всего здания! Сохраняя спокойствие, покиньте квартиру по лестничной клетке — лифтами пользоваться запрещено!»

Значения времени оповещения, полученные в трех сериях экспериментов в зависимости от сценариев и количества оповещающих людей, представлены в табл. 2.

Для большей наглядности средние значения времени оповещения в зависимости от количества оповещающих для каждого сценария приведены в виде графиков на рис. 9 и 10. По полученным на графиках точкам были также построены математические модели с помощью степенной функции, описывающей выявленную зависимость с корреляционным отношением, близким к единице. Выражения зависимостей для определения времени оповещения ($t_{\text{оп}}$, мин) от количества оповещающих (N , чел.) для сценария 1 и сценария 2 приведены в формулах (2) и (3) соответственно и указаны на рис. 9 и 10 пунктирной линией голубого цвета.

$$t_{\text{оп}} = 23,1N^{-1,075}, \quad (2)$$

$$t_{\text{оп}} = 21N^{-1,05}. \quad (3)$$

Полученные экспериментальные данные весьма разнообразны в зависимости от рассмотренных сценариев (очевидно, что оповещение квартир по этажам снизу-вверх происходит дольше), однако наибольшее влияние на результат оказывает количество оповещающих людей. Время оповещения жилого здания одним и тремя людьми отличается примерно в три раза (20,42 мин и 6,98 мин). Дальнейшее увеличение количества оповещающих уменьшает общее время оповещения с меньшей интенсивностью. Каково же оптимальное количество оповещающих в 9-этажном жилом здании?

Для определения этого показателя на рис. 11 приведены графики, построенные по ранее

Таблица 2. Время, необходимое на организацию оповещения в секции девятиэтажного жилого здания при отсутствии системы пожарной сигнализации

Table 2. The time required to organize an alert in a section of a nine-storey residential building in the absence of a fire alarm systems

Номер серии эксперимента Experiment series number	Время оповещения, мин Notification time, min					
	1 оповещающий 1 notifying person		2 оповещающих 2 notifying persons		3 оповещающих 3 notifying persons	
	Сценарий 1 (движение снизу вверх) Scenario 1 (movement from bottom to top)	Сценарий 2 (движение сверху вниз) Scenario 2 (movement from top to bottom)	Сценарий 1 (движение снизу вверх) Scenario 1 (movement from bottom to top)	Сценарий 2 (движение сверху вниз) Scenario 2 (movement from top to bottom)	Сценарий 1 (движение снизу вверх) Scenario 1 (movement from bottom to top)	Сценарий 2 (движение сверху вниз) Scenario 2 (movement from top to bottom)
1	20,25	19,35	12,17	10,97	7,42	6,95
2	20,53	19,55	12,13	11,08	7,50	6,98
3	20,45	19,70	12,22	11,10	7,48	7,00
Среднее значение Average value	20,41	19,53	12,17	11,05	7,47	6,98

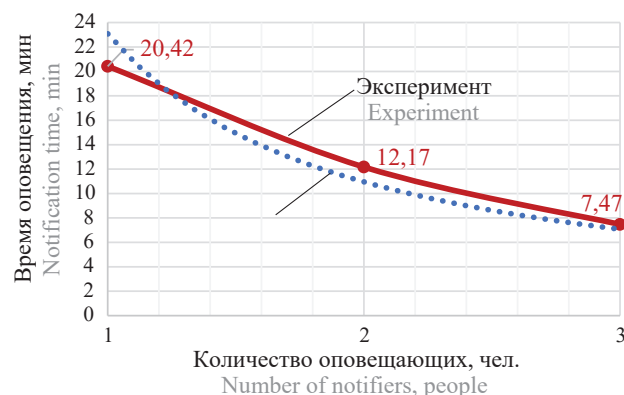


Рис. 9. Время оповещения людей по сценарию 1 в зависимости от количества оповещающих

Fig. 9. The time of notification of people according to scenario 1, depending on the number of notifiers

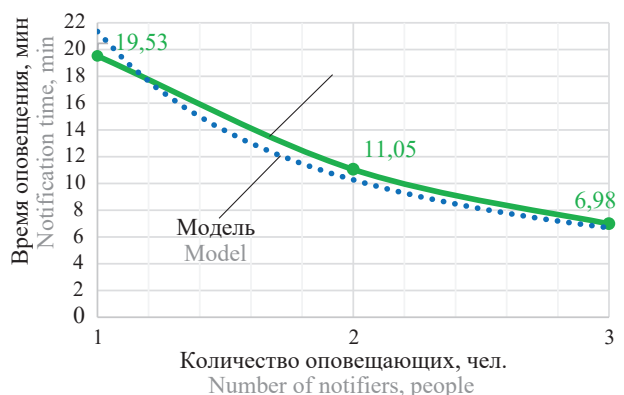


Рис. 10. Время оповещения людей по сценарию 2 в зависимости от количества оповещающих

Fig. 10. The time of notification of people according to scenario 2, depending on the number of notifiers

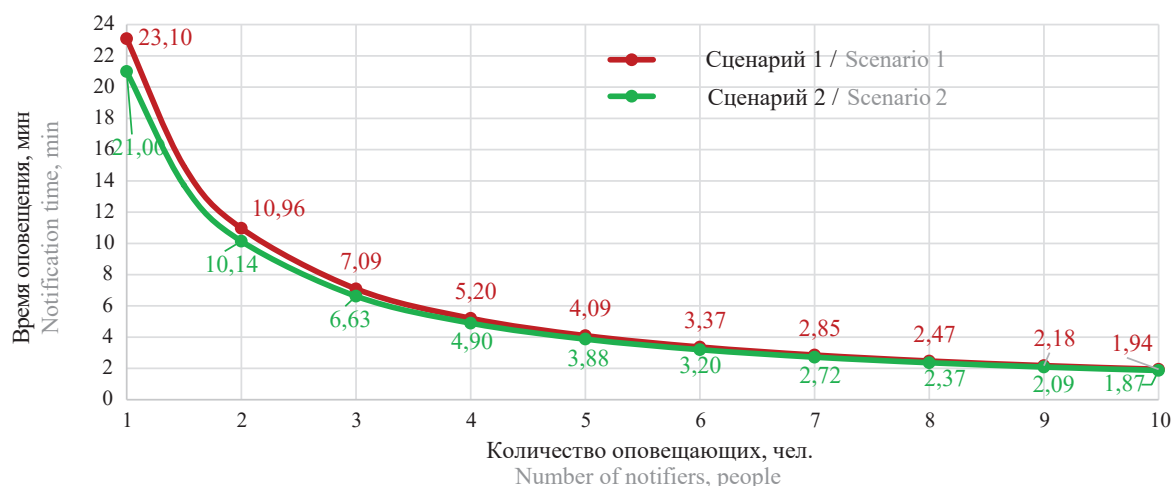


Рис. 11. Полученные зависимости времени оповещения людей от количества оповещающих по сценариям 1 и 2

Fig. 11. The obtained dependences of the notification time of people on the number of notifiers in scenarios 1 and 2

полученным степенным зависимостям (2) и (3) для сценария 1 и сценария 2.

Учитывая опасность обстановки, складывающейся при возникновении пожара, необходимо исключить возможность проведения оповещения одним человеком всего здания (рис. 8, а), а также одиночного оповещения по распределенным по вертикали зонам (рис. 8, с) ввиду сложности организации такого способа оповещения.

Целесообразно проводить оповещение по двое человек на этаже (рис. 8, б), в том числе несколькими группами при делении здания по зонам в несколько этажей. Действия людей при таком способе получаются более слаженными, что также наблюдалось авторами при проведении экспериментов.

Анализ графиков, приведенных на рис. 11, позволяет заключить, что оптимальное количество оповещающих людей для 9-этажного жилого дома составляет 6 человек, т.е. 3 группы по 2 человека. Кривые на графике в указанной точке проходят очень близко, и значения времени оповещения при перемещении оповещающих по этажам снизу-вверх или сверху-вниз очень близки.

Таким образом, коллектив из 6 человек сможет провести оповещение всего здания меньше чем за 3,5 мин. Задействование большего количества людей весомого эффекта не дает, при этом подвергая опасности большее количество людей.

Исходя из рассмотренной концепции, можно попытаться определить, сколько групп оповещающих людей необходимо для информирования жильцов в зданиях без устройства СОУЭ с иной (различной) этажностью (табл. 3).

Таким образом, для проведения оповещения жителей секции дома с количеством этажей не более трех достаточно одной пары оповещающих. Для жилых зданий от 4 до 5 этажей требу-

ется 2 пары оповещающих, а для эффективного оповещения жителей секции 6–9-этажного дома необходимо уже 3 пары оповещающих людей.

Результаты экспериментов по исследованию времени реакции людей на сигнал о пожаре после статистической обработки приведены в табл. 4.

Анализ результатов в табл. 4 говорит о более быстрой реакции людей на сигнал о пожаре в дневное время (среднее значение 72 с) нежели в ночное (112,3 с) (разница составляет немногим более 40 с), что вполне предсказуемо, учитывая состояния людей (бодрствование или сон). Об этом также говорит и численность выборки: в ночное время меньшее количество жителей пожелало

Таблица 3. Количество групп оповещающих, состоящих из двух человек в зависимости от этажности секции жилого здания без СОУЭ

Table 3. The number of notification groups consisting of two people, depending on the number of floors of a section of a residential building without a system of annunciation and management of human evacuation at fire

Этажность здания Number of storeys of the building	Количество групп оповещающих, состоящих из двух человек The number of notification groups consisting of two people
1	1
2	1
3	1
4	2
5	2
6	3
7	3
8	3
9	3

Таблица 4. Результаты первичной статистической обработки экспериментальных данных времени реакции людей на сигнал о пожаре**Table 4.** Results of primary statistical processing of experimental data on people's reaction time to a fire alarm

Условия проведения эксперимента Conditions of the experiment	Численность выборки Sample size	Параметр времени реакции людей, с Parameter of people's reaction time, s				
		Среднее Average	Дисперсия Variance	Стандартное отклонение Standard deviation	Минимум Minimum	Максимум Maximum
Дневное время Daytime	30	72,0	1270,9	35,6	17,8	174,3
Ночное время Night time	13	112,3	4058,3	63,7	14,7	207,8

участвовать в эксперименте. Разница между максимальным и минимальным значениями временем реакции людей в дневное время составляет 156,5 с, а в ночное время — 193,1 с.

Обобщая результаты первого ($t_{об} + t_{оп}$) и второго ($t_o + t_{под}$) исследований, рассмотренных в данной статье, возможно определить значения времени начала эвакуации для каждого этажа девятиэтажного жилого дома. Результаты представлены в табл. 5. В качестве показателей времени оповещения в указанной таблице используются максимальные значения времени оповещения этажей, проводимого одним человеком снизу вверх. В качестве времени реакции на сигнал оповещения выбрано максимальное значение, полученное в ночное время. Данные параметры, по мнению авторов, являются наиболее пессимистичными, но и, увы, наиболее вероятными.

Представленные в табл. 5 данные позволяют получить простое аналитическое соотношение для

оценки времени начала эвакуации $t_{нэ}$ для того или иного этажа здания:

$$t_{нэ} = 2,3N_{эт} + 3,5, \text{ мин}, \quad (4)$$

где $N_{эт}$ — номер этажа, для которого определяется $t_{нэ}$.

Для этажа пожара $N_{эт}$ принимается равным 0.

На рис. 12 приводится сравнение экспериментальных значений, приведенных в табл. 5, с данными действующей Методики⁸.

При самом пессимистическом стечении обстоятельств, когда оповещение происходит одним человеком, движущимся по этажам снизу вверх, и максимальном значении времени реакции людей на сигнал о пожаре показатели времени начала эвакуации, полученные в эксперименте для девятиэтажного дома, превышают нормативные, установленные в Методике⁸, в 2,6 раза.

Основываясь на результатах исследований, можно полагать, что приведенные в Методике⁸ значения времени начала эвакуации людей $t_{нэ}$ для

Таблица 5. Значения времени начала эвакуации, полученные с учетом значений времени оповещения людей и времени их реакции на сигнал о пожаре**Table 5.** The values of the pre-evacuation time obtained taking into account the values of the time of notification of people and the time of their reaction to the fire alarm

Этаж Floor	Время оповещения, мин Notification time, min	Время реакции, мин Reaction time, min	Время начала эвакуации, мин Pre-evacuation time, min
1	2,3	3,5	5,8
2	4,6	3,5	8,1
3	6,8	3,5	10,3
4	9,1	3,5	12,6
5	11,4	3,5	14,9
6	13,7	3,5	17,2
7	15,9	3,5	19,4
8	18,2	3,5	21,7
9	20,5	3,5	24,0

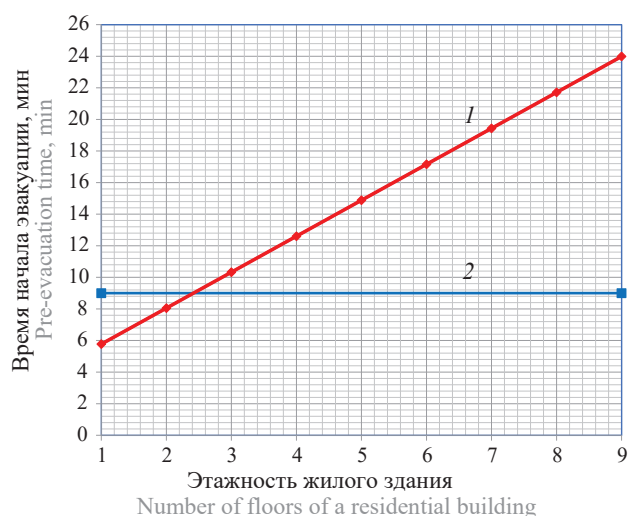


Рис. 12. Сравнение экспериментальных значений с данными действующей Методики⁸: 1 — максимальные значения времени начала эвакуации, полученные в экспериментах; 2 — максимальные значения времени начала эвакуации при отсутствии в здании СОУЭ согласно Методике⁸

Fig. 12. Comparison of experimental values with the data of the current Methodology of fire risk calculation⁸: 1 — maximum values of pre-evacuation time obtained in experiments; 2 — values of pre-evacuation time in the absence of a system of annunciation and management of human evacuation at fire in the building according to Methodology⁸

жилых зданий без СОУЭ справедливо использовать только для 1–2-этажных зданий.

Выводы

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Холицевников В.В., Самошин Д.А., Парфененко А.П., Кудрин И.С., Истратов Р.Н., Бело-сохов И.Р. Эвакуация и поведение людей при пожарах. М.: Академия ГПС МЧС России, 2015. 262 с.
2. Bryan J.L. A study of the survivors' reports on the panic in the fire at the Arundel Park Hall in Brooklyn, Maryland, on January 29, 1956 // Fire Protection Curriculum. University of Maryland, College Park. Maryland, 1957.
3. Wood P.G. The behaviour of people in fires // Fire Research Note. No. 953. Loughborough University of Technology. England, 1972. 113 p.
4. Демченко О.Ю., Газизова Ю.С. Гендерные особенности формирования образа ситуации пожарной опасности // Пожаровзрывобезопасность/Fire and Explosion Safety. 2015. Т. 24. № 12. С. 46–52. DOI: 10.18322/PVB.2015.24.12.46-52
5. Истратов Р.Н., Холицевников В.В., Самошин Д.А. Эвакуация и спасение людей при пожарах в домах для престарелых. М.: Академия ГПС МЧС России, 2019. 94 с.
6. Mytton J., Goodenough T., Novak C. Children and young people's behaviour in accidental dwelling fires: a systematic review of the qualitative literature // Safety Science. 2017. Vol. 96. Pp. 143–149. DOI: 10.1016/j.ssci.2017.03.019
7. Котик М.А. Психология и безопасность. Таллин: Валгус, 1984. 408 с.
8. Egodage N., Abdeen F., Sridarran P. Fire emergency evacuation procedures for differently-abled community in high-rise buildings // Journal of Facilities Management. 2020. Vol. 18. Issue 5. Pp. 505–519. DOI: 10.1108/jfm-07-2020-0043
9. Boyce K. Safe evacuation for all — Fact or Fantasy? Past experiences, current understanding and future challenges // Fire Safety Journal. 2017. Vol. 91. Pp. 28–40. DOI: 10.1016/j.firesaf.2017.05.004
10. Geoerg P., Berchtold F., Gwynne S.M., Boyce K., Holl S., Hofmann A. Engineering egress data considering pedestrians with reduced mobility // Fire and Materials. 2019. Vol. 43. Issue 7. Pp. 759–781. DOI: 10.1002/fam.2736
11. Cassidy P., McConnell N., Boyce K. The older adult: Associated fire risks and current challenges for the de-

Анализ данных пожарной статистики и нормативных документов в области пожарной безопасности позволяет сделать вывод, что наиболее уязвимыми при пожаре в жилом секторе являются здания высотой от 9 и менее этажей, ввиду отсутствия в них технических средств пожарной автоматики и СОУЭ, а в зданиях более ранней постройки и СПС. При этом проведенные серии экспериментов по оповещению жильцов о пожаре голосом и по исследованию времени реакции людей на сигнал о пожаре показывают значительные затраты времени на этапе формирования величины времени начала эвакуации. В рамках исследования было определено оптимальное количество человек для проведения оповещения о пожаре в жилой секции в зависимости от ее этажности. А для определения величины времени начала эвакуации людей на конкретном этаже жилого здания была предложена аналитическая формула.

Сравнительный анализ впервые полученных экспериментальных и нормативных⁸ значений времени начала эвакуации для типового 9-этажного жилого здания без СОУЭ показал их расхождение более чем в 2,5 раза, что говорит о необходимости корректировки этих показателей в Методике⁸ в зависимости от этажности здания. В настоящий момент применение имеющихся нормативных значений времени начала эвакуации допустимо только при наличии в секциях жилых зданий без СОУЭ не более двух этажей.

- velopment of future fire safety intervention strategies // *Fire and Materials*. 2020. Vol. 45. Issue 4. Pp. 553–563. DOI: 10.1002/fam.2823
12. Samoshin D.A., Boyce K.E., Shields T.J. An investigation into staff behaviour in unannounced evacuation of retail stores — Implication for training and fire safety engineering // *Fire Safety Science*. 2005. Vol. 8. Pp. 519–530. DOI: 10.3801/IAFSS.FSS.8-519
 13. Boyce K., McConnell N., Shields J. Evacuation response behaviour in unannounced evacuation of licensed premises // *Fire and Materials*. 2017. Vol. 41. Issue 5. Pp. 454–466. DOI: 10.1002/fam.2430
 14. Ronchi E., Fridolf K., Frantzych H., Nilsson D., Walter A.L., Modig H. A tunnel evacuation experiment on movement speed and exit choice in smoke // *Fire Safety Journal*. 2017. Vol. 97. Pp. 126–136. DOI: 10.1016/J.FIRESAF.2017.06.002
 15. Fu M., Liu R., Zhang Y. Why do people make risky decisions during a fire evacuation? Study on the effect of smoke level, individual risk preference, and neighbor behavior // *Safety Science*. 2021. Vol. 140. P. 105245. DOI: 10.1016/j.ssci.2021.105245
 16. Sime J. Understanding human behavior in fires: An emerging theory of occupancy // Inaguration Lecture on 14 October, 1999. University of Ulster, 1999.
 17. Lovreglio R., Ronchi E., Nilsson D. An evacuation decision model based on perceived risk, social influence and behavioural uncertainty // *Simulation Modelling Practice and Theory*. 2016. Vol. 66. Pp. 226–242. DOI: 10.1016/j.simpat.2016.03.006
 18. Gwynne S.M., Amos M., Kinatader M., Bénichou N., Boyce K., Wal C.N. et al. The future of evacuation drills: Assessing and enhancing evacuee performance // *Safety Science*. 2020. Vol. 129. P. 104767. DOI: 10.1016/j.ssci.2020.104767
 19. Kinatader M., Ma C., Gwynne S.M., Amos M., Bénichou N. Where drills differ from evacuations: A case study on Canadian buildings // *Safety Science*. 2021. Vol. 135. P. 105114. DOI: 10.1016/j.ssci.2020.105114
 20. Gerges M., Penn S., Moore D., Boothman C., Liyanage C. Multi-storey residential buildings and occupant's behaviour during fire evacuation in the UK: Factors relevant to the development of evacuation strategies // *International Journal of Building Pathology and Adaptation*. 2018. Vol. 36. Issue 3. Pp. 234–253. DOI: 10.1108/IJBPA-08-2017-0033
 21. Mossberg A., Nilsson D., Andrée K. Unannounced evacuation experiment in a high-rise hotel building with evacuation elevators: A study of evacuation behaviour using eye-tracking // *Fire Technology*. 2021. Vol. 57. Issue 3. Pp. 1259–1281. DOI: 10.1007/s10694-020-01046-1
 22. Proulx G., Latour J.C., McLaurin J. W., Pineau J., Hoffman L.E., Laroche C. Housing evacuation of mixed abilities occupants in highrise buildings // Internal Report No. 706. National Research Council of Canada. Ottawa, 1995.
 23. Brennan P. Timing human response in real fires // *Fire safety science — proceedings of the fifth international symposium // International Association Fire Safety Science*. 1997. Pp. 807–818.
 24. Proulx G., Latour J., MacLaurin J. Housing evacuation of mixed abilities occupants // Internal Report No. 661. National Research Council of Canada. Ottawa, 1994.
 25. Fahy R., Proulx G. Toward creating a database on delay times to start evacuation and walking speeds for use in evacuation modeling // *Proceedings of the 2nd International Conference on Human Behaviour in Fire 2001*. Inter-science Communications Ltd. London, 2001. Pp. 175–179.
 26. Rahouti A., Lovreglio R., Dias C., Kuligowski E.D., Gai G., Mendola S.L. Investigating office buildings evacuations using unannounced fire drills: The case study of CERN, Switzerland // *Fire Safety Journal*. 2021. Vol. 125. P. 103403. DOI: 10.1016/j.firesaf.2021.103403
 27. Le A.B., Middlestadt S.E., Lin H., Docherty C.L., Smith T.D. Belief factors associated with employees' intention to evacuate during a fire alarm // *Workplace Health & Safety*. 2022. DOI: 10.1177/21650799221093773
 28. Шильдс Т.Дж., Бойс К.Е., Самошин Д.А. Исследование эвакуации крупных торговых комплексов // *Пожаровзрывобезопасность/Fire and Explosion Safety*. 2002. Т. 11. № 6. С. 57–66.
 29. Lovreglio R., Kuligowski E.D. A pre-evacuation study using data from evacuation drills and false alarm evacuations in a university library // *Fire Safety Journal*. 2022. Vol. 131. P. 103595. DOI: 10.1016/j.firesaf.2022.103595
 30. Galea E.R., Deere S., Hopkin C., Xie H. Evacuation response behaviour of occupants in a large theatre during a live performance // *Fire and Materials*. 2017. Vol. 41. Issue 5. Pp. 467–492. DOI: 10.1002/fam.2424
 31. Rahouti A., Lovreglio R., Gwynne S.M., Jackson P., Datoussaïd S., Hunt A. Human behaviour during a healthcare facility evacuation drills: Investigation of pre-evacuation and travel phases // *Safety Science*. 2020. Vol. 129. P. 104754. DOI: 10.1016/j.ssci.2020.104754
 32. 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
 33. Proulx G., Fahy R.F. The time delay to start evacuation: Review of five case studies // *Proceedings of the Fifth International Symposium on Fire Safety Science*. International Association for Fire Safety Science, 1997. Pp. 783–794.
 34. Самошин Д.А., Холицевников В.В. Проблемы нормирования времени начала эвакуации // *Пожаровзрывобезопасность/Fire and Explosion Safety*. 2016. Т. 25. № 5. С. 37–51. DOI: 10.18322/ПВБ.2016.25.05.37-51

35. Самошин Д.А. Законы распределения случайной величины времени начала эвакуации людей при пожарах // Технологии техносферной безопасности. 2016. № 2 (66). С. 104–113. URL: <http://agps-2006.narod.ru/ttb/2016-2/35-02-16.ttb.pdf>
36. Аниськина Ю.А., Самошин Д.А. Влияние автоматических систем обнаружения пожара, оповещения и управления эвакуацией людей на время начала эвакуации // Пожары и чрезвычайные ситуации: предотвращение, ликвидация. 2018. № 4. С. 26–31. DOI: 10.25257/FE.2018.4.26-31
37. Самошин Д.А. К вопросу о защите людей техническими средствами пожарной автоматики // Пожаровзрывобезопасность/Fire and Explosion Safety. 2015. Т. 24. № 12. С. 53–59. DOI: 10.18322/PVB.2015.24.12.53-59
38. Ивакин А.А., Шаранова М.М., Самошин Д.А. Проблемы защиты людей техническими средствами пожарной автоматики в жилых зданиях при пожаре // Технологии техносферной безопасности. 2019. № 4 (86). С. 45–52. DOI: 10.25257/TTS.2019.4.86.45-52
39. Калмыков С.П., Есин В.М. Время обнаружения очага пожара // Пожаровзрывобезопасность/Fire and Explosion Safety. 2017. Т. 26. № 11. С. 53–63. DOI: 10.18322/PVB.2017.26.11.52-63
40. Парфененко А.П. Нормирование требований пожарной безопасности к эвакуационным путям и выходам в зданиях детских дошкольных образовательных учреждений : дис. ... канд. техн. наук. М. : Академия ГПС МЧС России, 2012. 153 с.
41. Аниськина Ю.А., Хасуева З.С., Самошин Д.А. О влиянии степени готовности медицинского персонала к действиям при пожаре на время начала эвакуации больниц // Технологии техносферной безопасности. 2016. № 6 (70). С. 189–196. URL: <http://agps-2006.narod.ru/ttb/2016-6/03-06-16.ttb.pdf>
42. Аниськина Ю.А., Самошин Д.А. Зависимость времени начала эвакуации от уровня противопожарной подготовки персонала учреждения здравоохранения со стационаром // Пожары и чрезвычайные ситуации: предотвращение, ликвидация. 2020. № 2. С. 33–41. DOI: 10.25257/FE.2020.2.33-41
43. Фан А., Слюсарев С.В., Самошин Д.А. Исследования времени начала эвакуации людей, находящихся в состоянии сна, из специализированных учреждений и жилых зданий // Пожаровзрывобезопасность/Fire and Explosion Safety. 2016. Т. 28. № 8. С. 58–67. DOI: 10.18322/PVB.2016.28.08.58-67
44. Холщевников В.В., Семин А.А., Тактаев И.А. Исследование значений времени начала эвакуации в зданиях лечебных учреждений // Вестник Томского Государственного архитектурно-строительного университета. 2021. Т. 23. № 1. С. 105–115. DOI: 10.31675/1607-1859-2021-23-1-105-115
45. Шахуов Т.Ж., Самошин Д.А. Исследование времени начала эвакуации людей в мечетях // Пожары и чрезвычайные ситуации: предотвращение, ликвидация. 2017. № 1. С. 20–24. DOI: 10.25257/FE.2017.1.20-24
46. Лапина Т.П. К вопросу об исследовании времени начала эвакуации людей при пожаре // Системы безопасности : мат. междунар. науч.-техн. конф. М. : Академия ГПС МЧС России, 2018. № 27. С. 255–258.

REFERENCES

1. Kholshchevnikov 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, State Fire Academy of Emercom of Russia Publ., 2015; 262. (rus).
2. Bryan J.L. A study of the survivors' reports on the panic in the fire at the Arundel Park Hall in Brooklyn, Maryland, on January 29, 1956. *Fire Protection Curriculum. University of Maryland, College Park*. Maryland, 1957.
3. Wood P.G. The behaviour of people in fires. *Fire Research Note No. 953, Loughborough University of Technology*. England, 1972; 113.
4. Demchenko O.Yu., Gazizova Yu.S. Gender features of formation of the fire danger situation image. *Pozharovzryvobezopasnost/Fire and Explosion Safety*. 2015; 24(12):46-52. DOI: 10.18322/PVB.2015.24.12.46-52 (rus).
5. Istratov R.N., Kholshchevnikov V.V., Samoshin D.A. *Evacuation and rescue of people during fires in homes for the elderly*. Moscow, State Fire Academy of EMERCOM of Russia Publ., 2019; 94. (rus).
6. Mytton J., Goodenough T., Novak C. Children and young people's behaviour in accidental dwelling fires: a systematic review of the qualitative literature. *Safety Science*. 2017; 96:143-149. DOI: 10.1016/j.ssci.2017.03.019
7. Kotik M.A. *Psychology and security*. Tallinn, Valgus, 1984; 408. (rus).
8. Egodage N., Abdeen F., Sridarran P. Fire emergency evacuation procedures for differently-abled community in high-rise buildings. *Journal of Facilities Management*. 2020; 18(5):505-519. DOI: 10.1108/jfm-07-2020-0043
9. Boyce K. Safe evacuation for all — Fact or Fantasy? Past experiences, current understanding and future challenges. *Fire Safety Journal*. 2017; 91:28-40. DOI: 10.1016/j.firesaf.2017.05.004
10. Geoerg P., Berchtold F., Gwynne S.M., Boyce K., Holl S., Hofmann A. Engineering egress data consid-

- ring pedestrians with reduced mobility. *Fire and Materials*. 2019; 43(7):759-781. DOI: 10.1002/fam.2736
11. Cassidy P., McConnell N., Boyce K. The older adult: Associated fire risks and current challenges for the development of future fire safety intervention strategies. *Fire and Materials*. 2020; 45(4):553-563. DOI: 10.1002/fam.2823.
 12. Samoshin D.A., Boyce K.E., Shields T.J. An investigation into staff behaviour in unannounced evacuation of retail stores — Implication for training and fire safety engineering. *Fire Safety Science*. 2005; 8:519-530. DOI: 10.3801/IAFSS.FSS.8-519
 13. Boyce K., McConnell N., Shields J. Evacuation response behaviour in unannounced evacuation of licensed premises. *Fire and Materials*. 2017; 41(5):454-466. DOI: 10.1002/fam.2430
 14. Ronchi E., Fridolf K., Frantzich H., Nilsson D., Walter A.L., Modig H. A tunnel evacuation experiment on movement speed and exit choice in smoke. *Fire Safety Journal*. 2017; 97:126-136. DOI: 10.1016/J.FIRESAF.2017.06.002
 15. Fu M., Liu R., Zhang Y. Why do people make risky decisions during a fire evacuation? Study on the effect of smoke level, individual risk preference, and neighbor behavior. *Safety Science*. 2021; 140:105245. DOI: 10.1016/J.SSCI.2021.105245
 16. Sime J. Understanding human behavior in fires: An emerging theory of occupancy. *Inaguration Lecture on 14 October, 1999*. University of Ulster, 1999.
 17. Lovreglio R., Ronchi E., Nilsson D. An evacuation decision model based on perceived risk, social influence and behavioural uncertainty. *Simulation Modelling Practice and Theory*. 2016; 66:226-242. DOI: 10.1016/j.simpat.2016.03.006
 18. Gwynne S.M., Amos M., Kinatader M., Bénichou N., Boyce K., Wal C.N. et al. The future of evacuation drills: Assessing and enhancing evacuee performance. *Safety Science*. 2020; 129:104767. DOI: 10.1016/j.ssci.2020.104767
 19. Kinatader M., Ma C., Gwynne S.M., Amos M., Bénichou N. Where drills differ from evacuations: A case study on Canadian buildings. *Safety Science*. 2021; 135:105114. DOI: 10.1016/j.ssci.2020.105114
 20. Gerges M., Penn S., Moore D., Boothman C., Liyanage C. Multi-storey residential buildings and occupant's behaviour during fire evacuation in the UK: Factors relevant to the development of evacuation strategies. *International Journal of Building Pathology and Adaptation*. 2018; 36(3):234-253. DOI: 10.1108/IJBPA-08-2017-0033
 21. Mossberg A., Nilsson D., Andrée K. Unannounced evacuation experiment in a high-rise hotel building with evacuation elevators: A study of evacuation behaviour using eye-tracking. *Fire Technology*. 2021; 57(3):1259-1281. DOI: 10.1007/s10694-020-01046-1
 22. Proulx G., Latour J.C., McLaurin J. W., Pineau J., Hofman L.E., Laroche C. Housing evacuation of mixed abilities occupants in highrise buildings. *Internal Report No. 706, National Research Council of Canada*. Ottawa, 1995.
 23. Brennan P. Timing human response in real fires. *Fire safety science — proceedings of the fifth international symposium. International Association Fire Safety Science*. 1997; 807-818.
 24. Proulx G., Latour J., MacLaurin J. Housing evacuation of mixed abilities occupants. *Internal Report No. 661. National Research Council of Canada*. Ottawa, 1994.
 25. Fahy R.F., Proulx G. Toward creating a database on delay times to start evacuation and walking speeds for use in evacuation modeling. *Proceedings of the 2nd International Conference on Human Behaviour in Fire 2001*. Inter-science Communications Ltd., London, 2001; 175-179.
 26. Rahouti A., Lovreglio R., Dias C., Kuligowski E.D., Gai G., Mendola S.L. Investigating office buildings evacuations using unannounced fire drills: The case study of CERN, Switzerland. *Fire Safety Journal*. 2021; 125:103403. DOI: 103403.10.1016/j.firesaf.2021.103403
 27. Le A.B., Middlestadt S.E., Lin H., Docherty C.L., Smith T.D. Belief factors associated with employees' intention to evacuate during a fire alarm. *Workplace health & safety*. 2022. DOI: 10.1177/21650799221093773
 28. Shilds T.J., Boys K.E., Samoshin D.A. Investigation of evacuation of large shopping complexes. *Pozharovzryvobezopasnost/Fire and Explosion Safety*. 2002; 11(6):57-66. (rus).
 29. Lovreglio R., Kuligowski E.D. A pre-evacuation study using data from evacuation drills and false alarm evacuations in a university library. *Fire Safety Journal*. 2022; 131:103595. DOI: 10.1016/j.firesaf.2022.103595
 30. Galea E.R., Deere S., Hopkin C., Xie H. Evacuation response behaviour of occupants in a large theatre during a live performance. *Fire and Materials*. 2017; 41(5):467-492. DOI: 10.1002/fam.2424
 31. Rahouti A., Lovreglio R., Gwynne S.M., Jackson P., Datoussaid S., Hunt A. Human behaviour during a healthcare facility evacuation drills: Investigation of pre-evacuation and travel phases. *Safety Science*. 2020; 129:104754. DOI: 10.1016/j.ssci.2020.104754
 32. 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
 33. Proulx G., Fahy R.F. The time delay to start evacuation: review of five case studies. *Proceedings of the Fifth International Symposium on Fire Safety Science*. International Association for Fire Safety Science, 1997; 783-794.
 34. Samoshin D.A., Kholshchevnikov V.V. Problems of regulation of time to start evacuation. *Pozharovzryvobezopasnost/Fire and Explosion Safety*. 2016; 25(5): 37-51. DOI: 10.18322/ПББ.2016.25.05.37-51 (rus).
 35. Samoshin D.A. The laws of distribution of random variable of people pre-movement time during fire evacuation. *Technology of Technosphere Safety*. 2019;

- 2(66):10. URL: <http://agps-2006.narod.ru/ttb/2016-2/35-02-16.ttb.pdf> (rus).
36. Aniskina Yu.A., Samoshin D.A. Influence of automatic systems of fire detection, warning and managing the evacuation of people in case of fire on the evacuation start time. *Fire and Emergencies: Prevention, Elimination*. 2018; 4:26-31. DOI: 10.25257/FE.2018.4.26-31 (rus).
 37. Samoshin D.A. Towards the discussion of the protection of building occupants with technical means of fire automatics. *Pozharovzryvobezopasnost/Fire and Explosion Safety*. 2015; 24(12):53-59. DOI: 10.18322/PVB.2015.24.12.53-59 (rus).
 38. Ivakin A.A., Sharanova M.M., Samoshin D.A. Problems of protection of residential buildings by technical means of fire automation systems. *Technology of Technosphere Safety*. 2019; 4(86):45-52. DOI: 10.25257/TTS.2019.4.86.45-52 (rus).
 39. Kalmykov S.P., Esin V.M. Fire detection time. *Pozharovzryvobezopasnost/Fire and Explosion Safety*. 2017; 26(11):52-63. DOI: 10.18322/PVB.2017.26.11.52-63 (rus).
 40. Parfenenko A.P. *Rationing of fire safety requirements for evacuation paths and exits in buildings of preschool educational institutions : dissertation of the candidate of technical sciences*. Moscow, 2012; 153. (rus).
 41. Aniskina Yu.A., Khasuyeva Z.S., Samoshin D.A. About influence of the degree of preparedness the medical personnel to action in case of fire at the start time of evacuation for hospital. *Technology of Technosphere Safety*. 2016; 6(70):189-196. URL: https://www.elibrary.ru/download/elibrary_29388770_53207528.pdf (rus).
 42. Aniskina Yu.A., Samoshin D.A. Dependence of pre-evacuation time on the level of fire prevention training of hospital staff. *Fire and Emergencies: Prevention, Elimination*. 2020; 2:33-41. DOI: 10.25257/FE.2020.2.33-41 (rus).
 43. Fan A., Slyusarev S.V., Samoshin D.A. Researches of the pre-movement time of evacuation of the people, staying in condition of a dream, from residential buildings and specialized institutions. *Pozharovzryvobezopasnost/Fire and Explosion Safety*. 2016; 28(8): 58-67. DOI: 10.18322/PVB.2016.28.08.58-67 (rus).
 44. Kholshchevnikov V.V., Semin A.A., Taktayev I.A. Evacuation beginning time in healthcare centres. *Vestnik Tomskogo gosudarstvennogo arkhitekturno-stroitel'nogo universiteta/Journal of Construction and Architecture*. 2021; 23(1):105-115. DOI: 10.31675/1607-1859-2021-23-1-105-115 (rus).
 45. Shakhov T., Samoshin D. Study of time of evacuation start of people in mosques. *Fire and Emergencies: Prevention, Elimination*. 2017; 1:20-24. DOI: 10.25257/FE.2017.1.20-24 (rus).
 46. Lapshina T.P. On the subject of the pre-movement time of peoples evacuation during fire. *Proceedings contain theses of reports on Twenty Seventh International Scientific-Technical Conference "Safety Systems — 2018"*. Moscow, Academy of State Fire Service, 2018; 255-258. (rus).

Поступила 07.06.2022, после доработки 27.07.2022;
принята к публикации 01.08.2022

Received June 7, 2022; Received in revised form July 27, 2022;
Accepted August 1, 2022

Информация об авторах

САМОШИН Дмитрий Александрович, д-р техн. наук, профессор, начальник учебно-научного комплекса пожарной безопасности объектов защиты, Академия Государственной противопожарной службы Министерства Российской Федерации по делам гражданской обороны, чрезвычайным ситуациям и ликвидации последствий стихийных бедствий, Россия, 129366, г. Москва, ул. Бориса Галущкина, 4; РИНЦ ID: 766965; Scopus Author ID: 23482846200; ResearcherID: ABF-9565-2021; ORCID: 0000-0001-5860-0349; e-mail: inbox-d@mail.ru

ИСТРАТОВ Роман Николаевич, канд. техн. наук, доцент кафедры пожарной безопасности в строительстве (в составе учебно-научного комплекса пожарной безопасности объектов защиты), Академия Государственной противопожарной службы Министерства Российской Федерации по делам гражданской обороны, чрезвычайным ситуациям и ликвидации последствий стихийных бедствий, Россия, 129366, г. Москва, ул. Бориса Галущкина, 4; РИНЦ ID: 771510; Scopus Author ID: 57189760362; ORCID: 0000-0002-8554-3789; e-mail: istr.roman@yandex.ru

Information about the authors

Dmitriy A. SAMOSHIN, Dr. Sci. (Eng.), Professor, Head of the Educational and Scientific Complex of Fire Safety of Objects of Protection, the State Fire Academy of the Ministry of Russian Federation for Civil Defense, Emergencies and Elimination on Consequences of Natural Disasters, Borisa Galushkina St., 4, Moscow, 129366, Russian Federation; ID RISC: 766965; Scopus Author ID: 23482846200; ResearcherID: ABF-9565-2021; ORCID: 0000-0001-5860-0349; e-mail: inbox-d@mail.ru

Roman N. ISTRATOV, Cand. Sci. (Eng.), Associate Professor of Fire Safety in Construction Department, the State Fire Academy of the Ministry of Russian Federation for Civil Defense, Emergencies and Elimination on Consequences of Natural Disasters, Borisa Galushkina St., 4, Moscow, 129366, Russian Federation; ID RISC: 771510; Scopus Author ID: 57189760362; ORCID: 0000-0002-8554-3789; e-mail: istr.roman@yandex.ru

ШАРАНОВА Милена Михайловна, инспектор группы профилактики пожаров, Специальная пожарно-спасательная часть № 14 Специального отдела № 6 Специального управления федеральной противопожарной службы № 3 Министерства Российской Федерации по делам гражданской обороны, чрезвычайным ситуациям и ликвидации последствий стихийных бедствий, Россия, 141401, Московская область, г. Химки, улица Бурденко, 3; ORCID: 0000-0003-4488-8657; e-mail: milena.s94@mail.ru

КОЧЕТЫГОВ Владимир Анатольевич, старший научный сотрудник учебно-научного комплекса пожарной безопасности объектов защиты, Академия Государственной противопожарной службы Министерства Российской Федерации по делам гражданской обороны, чрезвычайным ситуациям и ликвидации последствий стихийных бедствий, Россия, 129366, г. Москва, ул. Бориса Галушкина, 4; РИНЦ ID: 1155883; ORCID: 0000-0002-7207-9518; e-mail: kochetygov65@mail.ru

ТОМИН Сергей Витальевич, канд. техн. наук, доцент кафедры пожарной безопасности в строительстве (в составе учебно-научного комплекса пожарной безопасности объектов защиты), Академия Государственной противопожарной службы Министерства Российской Федерации по делам гражданской обороны, чрезвычайным ситуациям и ликвидации последствий стихийных бедствий, Россия, 129366, г. Москва, ул. Бориса Галушкина, 4; РИНЦ ID: 768847; ORCID: 0000-0001-5661-929X; e-mail: tominfireexpert@yandex.ru

ФРОЛОВ Алексей Геннадьевич, старший преподаватель кафедры пожарной безопасности в строительстве (в составе учебно-научного комплекса пожарной безопасности объектов защиты), Академия Государственной противопожарной службы Министерства Российской Федерации по делам гражданской обороны, чрезвычайным ситуациям и ликвидации последствий стихийных бедствий, Россия, 129366, г. Москва, ул. Бориса Галушкина, 4; РИНЦ ID: 767202; ORCID: 0000-0001-9660-0438; e-mail: frolovagen@mail.ru

Вклад авторов:

Самошин Д.А. — научное руководство; концепция исследования; итоговые выводы; итоговая корректировка текста.

Истратов Р.Н. — написание исходного текста; статистическая обработка экспериментальных данных.

Шаранова М.М. — проведение экспериментов; описание экспериментов.

Кочетыгов В.А. — корректировка и дополнение разделов: «Введение», «Аналитический обзор ранее проведенных исследований».

Томин С.В. — корректировка и дополнение раздела «Материалы и методы исследования».

Фролов А.Г. — корректировка и дополнение разделов «Результаты и их обсуждение», «Заключение».

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Milena M. SHARANOVA, Inspector of the Fire Prevention Group of the Special Fire and Rescue Department No. 14 of the Special Department No. 6 of the Special Directorate of the Federal Fire Service No. 3 of the Ministry of Russian Federation for Civil Defense, Emergencies and Elimination on Consequences of Natural Disasters, Burdenko St., 3, Khimki, Moscow region, 141401, Russian Federation; ORCID: 0000-0003-4488-8657; e-mail: milena.s94@mail.ru

Vladimir A. KOCHETYGOV, Senior Researcher of the Educational and Scientific Complex of Fire Safety of Objects of Protection, the State Fire Academy of the Ministry of Russian Federation for Civil Defense, Emergencies and Elimination on Consequences of Natural Disasters, Borisa Galushkina St., 4, Moscow, 129366, Russian Federation; ID RISC: 1155883; ORCID: 0000-0002-7207-9518; e-mail: kochetygov65@mail.ru

Sergey V. TOMIN, Cand. Sci. (Eng.), Associate Professor of Fire Safety in Construction Department, the State Fire Academy of the Ministry of Russian Federation for Civil Defense, Emergencies and Elimination on Consequences of Natural Disasters, Borisa Galushkina St., 4, Moscow, 129366, Russian Federation; ID RISC: 768847; ORCID: 0000-0001-5661-929X; e-mail: tominfireexpert@yandex.ru

Aleksey G. FROLOV, Senior Lecturer of Fire Safety in Construction Department, the State Fire Academy of the Ministry of Russian Federation for Civil Defense, Emergencies and Elimination on Consequences of Natural Disasters, Borisa Galushkina St., 4, Moscow, 129366, Russian Federation; ID RISC: 767202; ORCID: 0000-0001-9660-0438; e-mail: frolovagen@mail.ru

Contribution of the authors:

Dmitriy A. Samoshin — scientific guidance; research concept; final conclusions; final text correction.

Roman N. Istratov — writing the source text; statistical processing of experimental data.

Milena M. Sharanova — conducting experiments; description of experiments.

Vladimir A. Kochetygov — correction and addition of sections: Introduction, Analytical review of previously conducted studies.

Sergey V. Tomin — correction and addition of the section Materials and methods of research.

Aleksey G. Frolov — correction and addition of sections Results and their discussion, Conclusion.

The authors declare no conflicts of interests.

Влияние размеров ячеек вычислительной сетки и неоднородности вычислительной области на расчетное время обнаружения пожара

Сергей Петрович Калмыков ✉

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

АННОТАЦИЯ

Введение. В России, исходя из положений действующих нормативных документов, время начала эвакуации для помещения, в котором возник пожар, определяется в зависимости от его площади. По мнению некоторых авторов, время начала эвакуации людей является совокупностью «технической», в которую входит время обнаружения пожара, и «психофизической», определяемой поведенческими и организационными особенностями людей. Время обнаружения пожара в настоящее время при этом не учитывается.

Цель. Оценка влияния размеров ячеек вычислительной сетки и неоднородности вычислительной области на расчетное время обнаружения пожара.

Задачи. 1. Установить качественный характер влияния размеров ячеек вычислительной сетки и неоднородности вычислительной области на расчетное время обнаружения пожара.

2. Предложить рекомендации по определению расчетного времени обнаружения пожара.

Методы. Для исследований применялись методы компьютерного моделирования при помощи программного комплекса Fire Dynamics Simulator.

Результаты и их обсуждение. Применение сеток с различными размерами ячеек позволяет значительно сократить количество ячеек в вычислительной области и, как следствие, время вычислений. Однако это приводит к достаточно противоречивым результатам. Минимальные значения времени сокращаются почти в 3–4 раза по сравнению с однородной расчетной сеткой, а максимальное увеличивается в 2 раза.

Выводы. 1. Размеры ячеек вычислительной сетки и неоднородность вычислительной области оказывают значительное влияние на время обнаружения пожара.

2. Достаточно большой разброс значений расчетного времени обнаружения пожара может свидетельствовать о недостоверной оценке в целом времени начала эвакуации и получении некорректных выводов о безопасности эвакуации людей и/или о вероятности эвакуации людей.

3. Для корректной оценки времени начала эвакуации, принимаемого с учетом расчетного времени обнаружения пожара, рекомендуется использовать однородные вычислительные сетки с размерами ячеек, не превышающими 0,25 м.

Ключевые слова: время эвакуации; вероятность эвакуации; пожарный риск; оптическая плотность дыма; противопожарная защита; пожарная безопасность

Для цитирования: Калмыков С.П. Влияние размеров ячеек вычислительной сетки и неоднородности вычислительной области на расчетное время обнаружения пожара // Пожаровзрывобезопасность/Fire and Explosion Safety. 2022. Т. 31. № 4. С. 56–64. DOI: 10.22227/0869-7493.2022.31.04.56-64

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

Effect of computational grid cell size and heterogeneity of computing area for estimated fire detection time

Sergey P. Kalmykov ✉

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

ABSTRACT

Introduction. In Russia, based on the provisions of the current regulatory documents, the time for the start of evacuation for a room in which a fire broke out is determined depending on the area of the room. According to some authors, the time of the start of the evacuation of people is a combination of “technical”, which

includes the time of detection of a fire, and “psychophysical”, determined by the behavioral and organizational characteristics of the people who make it up. The fire detection time is currently not taken into account.

Purpose. Evaluation of the influence of the size of the cells of the computational grid and the inhomogeneity of the computational domain on the estimated time of fire detection.

Aims. 1. Establish the qualitative nature of the influence of the size of the cells of the computational grid and the inhomogeneity of the computational domain on the estimated time of fire detection.

2. Offer recommendations for determining the estimated time of fire detection.

Methods. For research, computer simulation methods were used using the Fire Dynamics Simulator software package.

Results and discussion. The use of grids with different cell sizes can significantly reduce the number of cells in the computational domain and, as a result, the computation time. However, this leads to rather contradictory results. The minimum time values are reduced by almost 3–4 times compared to a homogeneous computational grid, and the maximum time increases by 2 times.

Conclusions. 1. The size of the cells of the computational grid and the inhomogeneity of the computational domain have a significant impact on the time of fire detection.

2. A sufficiently large spread in the values of the estimated fire detection time may indicate an unreliable estimate of the total time for the start of evacuation and incorrect conclusions about the safe evacuation of people and/or the probability of evacuation of people.

3. For a correct estimate of the evacuation start time, taken into account the estimated fire detection time, it is recommended to use homogeneous computational grids with cell sizes not exceeding 0.25 m.

Keywords: evacuation time; evacuation probability; fire risk; smoke optical density; fire protection; fire safety

For citation: Kalmykov S.P. Effect of computational grid cell size and heterogeneity of computing area for estimated fire detection time. *Pozharovzryvobezopasnost/Fire and Explosion Safety*. 2022; 31(4):56-64. DOI: 10.22227/0869-7493.2022.31.04.56-64 (rus).

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

Введение

В соответствии со статьей 6 Федерального закона № 123-ФЗ «Технический регламент о требованиях пожарной безопасности» (далее — ФЗ № 123) предполагается два способа обеспечения пожарной безопасности на объекте защиты:

1) выполнены в полном объеме требования пожарной безопасности, установленные техническими регламентами, и пожарный риск не превышает допустимых значений, установленных ФЗ № 123;

2) выполнены в полном объеме требования пожарной безопасности, установленные техническими регламентами и нормативными документами по пожарной безопасности (далее — ПБ).

В случае обеспечения ПБ объекта защиты по первому способу величина пожарного риска не должна превышать требуемого значения, равного 10^{-6} .

При определении величины индивидуального пожарного риска рассчитывается ряд вероятностей, одной из которых является вероятность эвакуации людей.

Чем выше эта вероятность, тем меньше величина пожарного риска.

Кроме того, в соответствии со статьей 53 ФЗ № 123 в каждом здании должны быть объемно-планировочные решения и конструктивное исполнение эвакуационных путей, которые будут обеспечивать безопасную эвакуацию людей при пожаре.

Безопасная эвакуация людей при пожаре считается обеспеченной, если **промежуток времени от момента обнаружения пожара** до завершения эвакуации людей из здания или в безопасную зону менее или равен необходимому времени эвакуации при пожаре.

Условие своевременности эвакуации людей положено в основу описанных выше статей ФЗ № 123, однако при определении величины пожарного риска время от начала пожара до достижения критических значений опасных факторов пожара сравнивается с временем движения людей от наиболее удаленных рабочих мест до выхода наружу или в безопасную зону, причем люди начинают двигаться спустя некоторый промежуток времени, равный времени начала эвакуации, а при оценке безопасной эвакуации время движения людей сравнивается с необходимым временем эвакуации, но здесь люди начинают движение к эвакуационным выходам после обнаружения пожара. Информация о том, какова величина времени обнаружения пожара и какие методы его определения, в нормативных документах не приводится.

В РДН 73–45–89 «Временное руководство по проектированию систем оповещения о пожаре и управления эвакуацией людей при пожаре объектов народного хозяйства» время начала эвакуации учитывалось только инерционностью системы пожарной сигнализации и системы оповещения и управления людей при пожаре (далее — СОУЭ), психофизические особенности поведения людей,

оповещенных о возникновении пожара, при этом не рассматривались.

Кроме того, при определении времени начала эвакуации в части ее «технической» составляющей, а именно расчетного времени обнаружения пожара, не учитываются такие весьма очевидные факторы, как высота помещения, высота размещения пожарных извещателей и соотношение расстояний от очага пожара до пожарных извещателей, от очага пожара до перекрытия, от пожарных извещателей до перекрытия и т.п.

Это может послужить причиной занижения в целом времени начала эвакуации и привести, соответственно, к некорректным результатам при определении времени завершения эвакуации людей [1].

В зарубежных и отечественных научных отчетах и литературных источниках [2–10] приводится информация о методах проектирования систем обнаружения пожара (пожарной сигнализации) и требованиях к устройству этих систем, о выборе типа пожарных извещателей для конкретных помещений, о способах моделирования работы пожарных извещателей, об исследованиях влияния используемых моделей на время обнаружения пожара и т.п. Однако в доступных источниках отсутствует информация об исследованиях влияния размеров ячеек вычислительной сетки и неоднородности вычислительной области на расчетное время обнаружения пожара.

Проведенный анализ существующих методов определения времени начала эвакуации позволяет сделать вывод о целесообразности применения более дифференцированного подхода в отношении ее «технической» составляющей, необходимой для оценки безопасной эвакуации людей, а также при расчете величины пожарного риска, в части вероятности эвакуации.

В рамках настоящей статьи проведена проверка предположения о влиянии размеров ячеек вычислительной сетки и неоднородности вычислительной области на расчетное время обнаружения пожара, и, как следствие, на время начала эвакуации.

Для достижения поставленной цели необходимо решить следующие задачи.

1. Провести численные эксперименты по исследованию влияния размеров ячеек вычислительной сетки и неоднородности вычислительной области на расчетное время обнаружения пожара.

2. Установить качественный характер влияния размеров ячеек вычислительной сетки и неоднородности вычислительной области на расчетное время обнаружения пожара.

3. Предложить рекомендации по определению расчетного времени обнаружения пожара.

Методы

Для описания термогазодинамических процессов, протекающих при пожаре, используются три группы моделей: интегральные, зонные и полевые [11–16].

Для определения необходимого времени эвакуации все чаще применяется программный комплекс FDS, специально разработанный для моделирования пожаров [17–19]. В этом комплексе создается трехмерная вычислительная сетка, в пределах которой решаются уравнения сохранения энергии, движения и массы отдельных компонентов продуктов горения, выраженных в форме Навье – Стокса [20, 21].

При проведении численных экспериментов пожар считался обнаруженным, если в контрольных точках модели, соответствующих расстановке пожарных извещателей, достигались пороговые значения измеряемых параметров.

Пожарные извещатели (рис. 1) расставлялись в помещениях в соответствии с СП 484.1311500.2020 «Системы противопожарной защиты. Системы пожарной сигнализации и автоматизация систем противопожарной защиты. Нормы и правила проектирования» (далее — СП 484.1311500.2020). В качестве пожарных извещателей предполагалась установка точечных дымовых пожарных извещателей (далее — ДПИ).

Допустимая чувствительность ДПИ, согласно ГОСТ Р 53325–2012 «Техника пожарная. Технические средства пожарной автоматики. Общие технические требования и методы испытаний», принималась равной диапазону от 0,05 до 0,20 дБ/м. Тип ДПИ — ИП 212-45. Количество пожарных извещателей определялось с учетом радиуса зоны контроля, высота размещения — в пределах от 0,1 до 0,6 м от уровня перекрытия.

Прямое моделирование работы дымового пожарного извещателя в работе не рассматривалось.

Расчетное время обнаружения пожара (время срабатывания автоматической пожарной сигнализации) соответствует времени достижения оптической плотности дыма в одной или двух из контрольных точек, соответствующей допустимой чувствительности ДПИ, в зависимости от применяемых алгоритмов принятия решения о пожаре А или В по СП 484.1311500.2020.

Время обнаружения пожара для алгоритма А принималось как наименьшее время срабатывания одного из ДПИ.

Время обнаружения пожара для алгоритма В определялось идентично по времени срабатывания второго ДПИ, но с учетом интервала не более 60 с от срабатывания первого ДПИ.

Для реализации алгоритмов А и В защищаемое помещение контролировалось 15 ДПИ при условии, что каждая точка помещения контролируется одним ДПИ.

Время обнаружения пожара для алгоритма С в работе не рассматривалось.

Оценивалось время срабатывания ДПИ как при минимальной допустимой чувствительности 0,05 дБ/м, так и при максимальной 0,20 дБ/м.

Вид пожарной нагрузки и ее количество принимались в соответствии с базой данных [11, 12].

На рис. 1 представлена схема моделируемого сценария пожара, а именно пожар в помещении площадью 1000 м² и высотой 3,5 м в здании I степени огнестойкости (горючая нагрузка: здание I степени огнестойкости; мебель + ткани (0,75 + 0,25) [11]).

В данной серии численных экспериментов проведена оценка влияния размеров ячеек вычислительной сетки и неоднородности вычислительной области на время срабатывания ДПИ. Размеры ячеек вычислительной сетки принимались таким образом, чтобы учитывалась высота размещения ДПИ. Форма ячеек — куб. При указании размера ячеек указывается размер стороны куба.

При однородной вычислительной области размеры ячеек варьировались от 0,05 до 0,5 м. При неоднородной вычислительной области (в одной вычислительной области применялись сетки с различными размерами ячеек: по высоте области от 0 до 3 м и от 3 м до перекрытия помещения) размеры ячеек варьировались в нижней части области от 0,5 до 1 м, в верхней части — от 0,05 до 0,25 м.

В работе было проведено моделирование следующих сценариев:

- сценарий 1: вычислительная область однородная, размер ячеек 0,05 м;
- сценарий 2: вычислительная область однородная, размер ячеек 0,1 м;
- сценарий 3: вычислительная область однородная, размер ячеек 0,25 м;
- сценарий 4: вычислительная область однородная, размер ячеек 0,5 м;

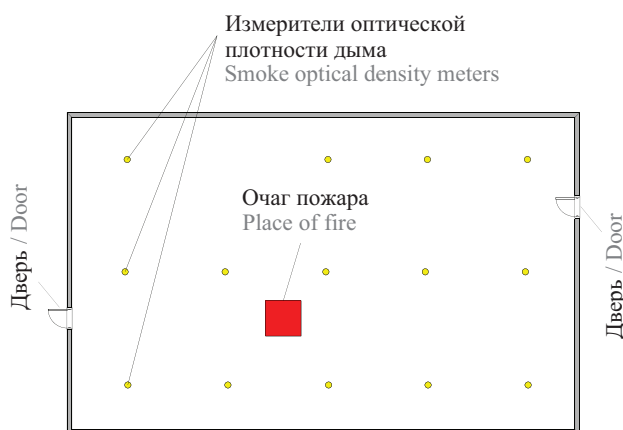


Рис. 1. Схема моделируемого сценария пожара

Fig. 1. Scheme of the simulated fire scenario

- сценарий 5: вычислительная область неоднородная, размер ячеек в нижней части области 0,5 м, в верхней — 0,25 м;
- сценарий 6: вычислительная область неоднородная, размер ячеек в нижней части области 1 м, в верхней — 0,05 м;
- сценарий 7: вычислительная область неоднородная, размер ячеек в нижней части области 1 м, в верхней — 0,1 м;
- сценарий 8: вычислительная область неоднородная, размер ячеек в нижней части области 1 м, в верхней — 0,25 м.

Результаты и их обсуждение

Результаты численных экспериментов представлены на рис. 2–9:

- рис. 2: вычислительная область однородная, размер ячеек 0,05 м;
- рис. 3: вычислительная область однородная, размер ячеек 0,1 м;
- рис. 4: вычислительная область однородная, размер ячеек 0,25 м;
- рис. 5: вычислительная область однородная, размер ячеек 0,5 м;
- рис. 6: вычислительная область неоднородная, размер ячеек в нижней части области 0,5 м, в верхней — 0,25 м;
- рис. 7: вычислительная область неоднородная, размер ячеек в нижней части области 1 м, в верхней — 0,05 м;
- рис. 8: вычислительная область неоднородная, размер ячеек в нижней части области 1 м, в верхней — 0,1 м;

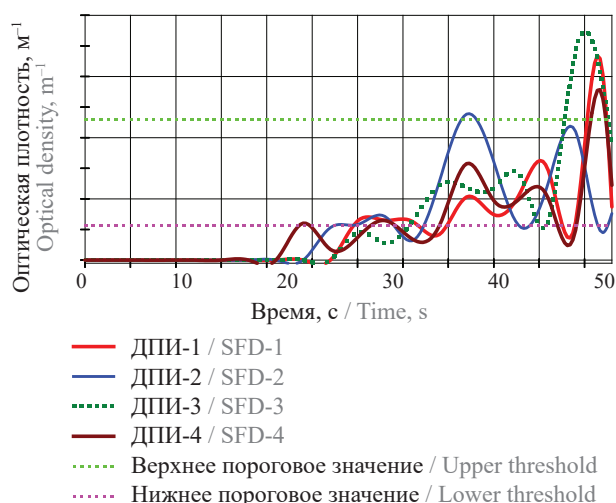
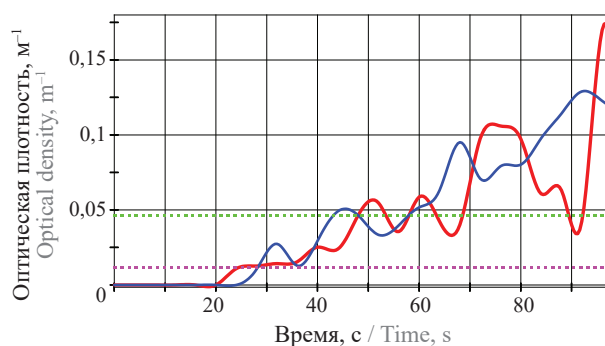


Рис. 2. Изменение оптической плотности дыма при пожаре в контрольных точках расчетной области — сценарий 1

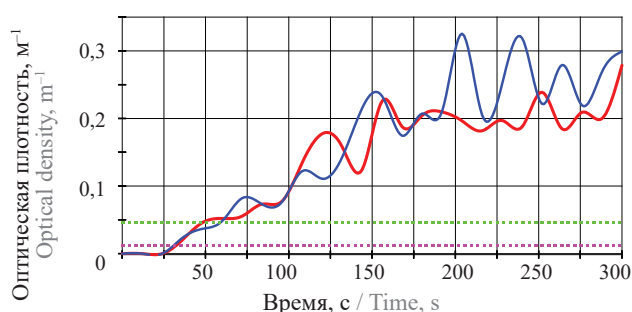
Fig. 2. Change in the optical density of smoke during a fire at the control points of the computational domain — scenario 1



— DPI-1 / SFD-1
 — DPI-2 / SFD-2
 Верхнее пороговое значение / Upper threshold
 Нижнее пороговое значение / Lower threshold

Рис. 3. Изменение оптической плотности дыма при пожаре в контрольных точках расчетной области — сценарий 2

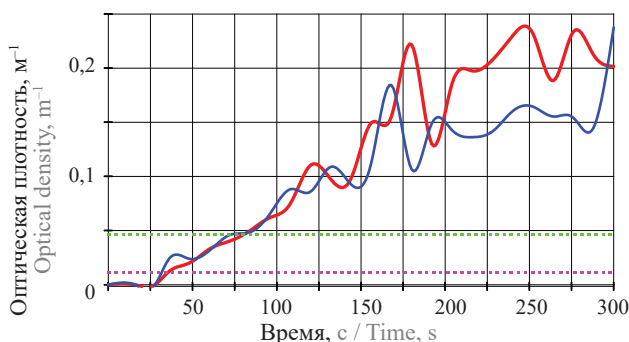
Fig. 3. Change in the optical density of smoke during a fire at the control points of the computational domain — scenario 2



— DPI-1 / SFD-1
 — DPI-2 / SFD-2
 Верхнее пороговое значение / Upper threshold
 Нижнее пороговое значение / Lower threshold

Рис. 4. Изменение оптической плотности дыма при пожаре в контрольных точках расчетной области — сценарий 3

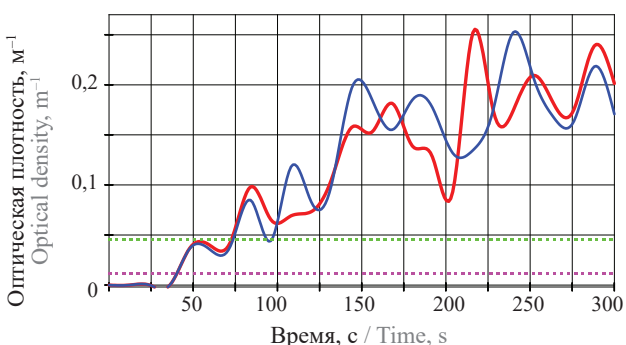
Fig. 4. Change in the optical density of smoke during a fire at the control points of the computational domain — scenario 3



— DPI-1 / SFD-1
 — DPI-2 / SFD-2
 Верхнее пороговое значение / Upper threshold
 Нижнее пороговое значение / Lower threshold

Рис. 5. Изменение оптической плотности дыма при пожаре в контрольных точках расчетной области — сценарий 4

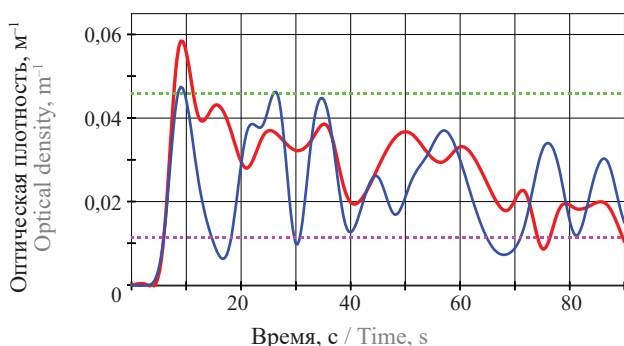
Fig. 5. Change in the optical density of smoke during a fire at the control points of the computational domain — scenario 4



— DPI-1 / SFD-1
 — DPI-2 / SFD-2
 Верхнее пороговое значение / Upper threshold
 Нижнее пороговое значение / Lower threshold

Рис. 6. Изменение оптической плотности дыма при пожаре в контрольных точках расчетной области — сценарий 5

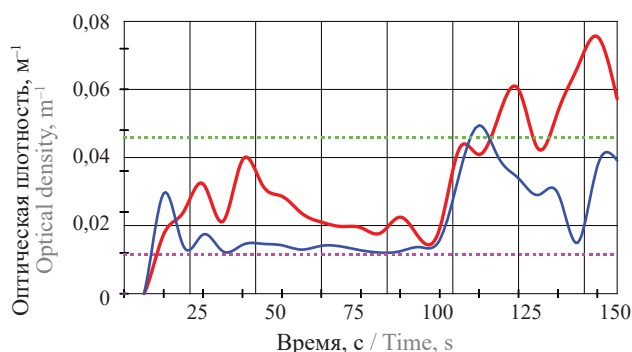
Fig. 6. Change in the optical density of smoke during a fire at the control points of the computational domain — scenario 5



— DPI-1 / SFD-1
 — DPI-2 / SFD-2
 Верхнее пороговое значение / Upper threshold
 Нижнее пороговое значение / Lower threshold

Рис. 7. Изменение оптической плотности дыма при пожаре в контрольных точках расчетной области — сценарий 6

Fig. 7. Change in the optical density of smoke during a fire at the control points of the computational domain — scenario 6



— DPI-1 / SFD-1
 — DPI-2 / SFD-2
 Верхнее пороговое значение / Upper threshold
 Нижнее пороговое значение / Lower threshold

Рис. 8. Изменение оптической плотности дыма при пожаре в контрольных точках расчетной области — сценарий 7

Fig. 8. Change in the optical density of smoke during a fire at the control points of the computational domain — scenario 7

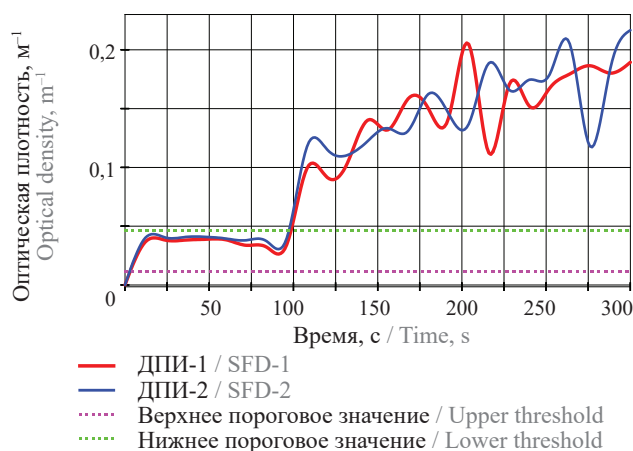


Рис. 9. Изменение оптической плотности дыма при пожаре в контрольных точках расчетной области — сценарий 8

Fig. 9. Change in the optical density of smoke during a fire at the control points of the computational domain — scenario 8

- рис. 9: вычислительная область неоднородная, размер ячеек в нижней части области 1 м, в верхней — 0,25 м.

Обобщенные данные по времени обнаружения пожара представлены в таблице.

Анализ полученных результатов численных экспериментов позволяет установить, что размеры ячеек вычислительной сетки и неоднородность вычислительной области оказывают значительное влияние на время обнаружения пожара (срабатывания ДПИ).

На основе анализа полученных данных установлено:

- минимальное время обнаружения пожара по алгоритму А при минимальной допустимой чувствительности составляет 8,1 с, а максимальной — 8,3 с;
- минимальное время обнаружения пожара по алгоритму В при минимальной допустимой

чувствительности составляет 8,3 с, а максимальной — 8,4 с;

- максимальное время обнаружения пожара по алгоритму А при минимальной допустимой чувствительности составляет 41,4 с, а максимальной — 98,7 с;
- максимальное время обнаружения пожара по алгоритму В при минимальной допустимой чувствительности составляет 42 с, а максимальной — 99,5 с.

Минимальное и максимальное время обнаружения пожара среди всех сценариев по алгоритму А при допустимом диапазоне чувствительности варьируется от 8,3 до 98,7 с, а по алгоритму В — от 8,4 до 99,5 с (значения отличаются почти в 12 раз).

Значения времени обнаружения пожара при однородной расчетной сетке с размерами ячеек 0,05 и 0,5 м по алгоритму А при минимальной допустимой чувствительности составляют 23,1 и 34,8 с (отличие в 1,5 раза), а при максимальной допустимой чувствительности — 41,9 и 58 с соответственно (отличие в 1,4 раза), по алгоритму В при минимальной допустимой чувствительности 29,1 и 36,1 с (отличие в 1,2 раза), а при максимальной допустимой чувствительности — 43,8 и 58,9 с (отличие в 1,3 раза).

Значения времени обнаружения пожара при однородной расчетной сетке имеют вполне сопоставимый характер, особенно в диапазоне размеров ячеек от 0,05 до 0,25 м.

Для оценки достоверности получаемых на основе компьютерного моделирования значений времени обнаружения пожара необходимо их сопоставление с экспериментальными данными. Однако такое сравнение связано с рядом сложных многофакторных задач, одной из которых является воспроизведение исходных данных, заложенных

Расчетное время обнаружения пожара

Estimated fire detection time

Номер сценария Scenario number	Время от начала пожара до достижения пороговых значений для ДПИ, с Time from the start of a fire to reaching the threshold values for a smoke detector, s			
	Алгоритм А (0,05 дБ/м) Algorithm A (0.05 dB/m)	Алгоритм В (0,05 дБ/м) Algorithm B (0.05 dB/m)	Алгоритм А (0,2 дБ/м) Algorithm A (0.2 dB/m)	Алгоритм В (0,2 дБ/м) Algorithm B (0.2 dB/m)
1	23,1	29,1	41,9	43,8
2	24,1	26,5	41	43,1
3	27,9	29,7	42,3	48,3
4	34,8	36,1	58	58,9
5	41,4	42	77,4	77,4
6	8,1	8,3	8,3	8,4
7	13,2	13,7	98,7	99,5
8	8,8	9	96,9	97,2

в программные комплексы, при проведении натурных экспериментов и наоборот. Особенную сложность представляет воспроизведение свойств пожарной нагрузки, которые будут определять динамику пожара.

В качестве ориентира для значений времени обнаружения пожара можно использовать данные, указанные в работе [22]. Они находятся в диапазоне от 5 до 30 с. Но в этой работе не указано, в каких помещениях (размеры, геометрия, назначение) и при каких исходных данных получены эти значения. Следовательно, вопрос экспериментального обоснования размера ячеек расчетной области требует дополнительных исследований и проработки.

Фактическое время моделирования динамики пожара в достаточно больших по площади и объему помещениях в расчетной области с размерами ячеек до 0,25 м может исчисляться часами, а иногда и сотнями часов. Применение сеток с различными размерами ячеек позволяет значительно сократить количество ячеек в вычислительной области и, как следствие, время вычислений. При этом многие специалисты, выполняющие подобного вида расчеты, зачастую вынуждены идти на это. Однако подобный подход приводит к достаточно противоречивым результатам. Минимальные значения времени сокращаются почти в 3–4 раза по сравнению с однородной расчетной сеткой, а максимальное увеличивается в 2 раза.

Кроме того, время начала эвакуации для помещения очага пожара площадью 1000 м² согласно приказу МЧС России № 382 «Об утверждении мето-

дики определения расчетных величин пожарного риска в зданиях, сооружениях и строениях различных классов функциональной пожарной опасности» составляет 15 с, что в 2 раза больше минимального и в 6 раз меньше максимального времени обнаружения пожара, полученного в результате моделирования, описанного в данной статье.

Выводы

1. Установлено, что размеры ячеек вычислительной сетки и неоднородность вычислительной области оказывают значительное влияние на время обнаружения пожара.

2. Достаточно большой разброс значений времени обнаружения пожара, полученных при всех равных исходных данных, но при различных размерах ячеек вычислительной сетки и неоднородности вычислительной области в численных экспериментах на основе современных программных комплексов, и существенное отличие этих значений от значения, получаемого на основе существующего способа определения времени начала эвакуации, может свидетельствовать о недостоверной оценке в целом времени начала эвакуации и получении некорректных выводов о безопасной эвакуации людей и/или о вероятности эвакуации людей.

3. Для корректной оценки времени начала эвакуации, принимаемого с учетом расчетного времени обнаружения пожара, рекомендуется производить моделирование пожара на однородных вычислительных сетках вычислительной области с размерами ячеек, не превышающими 0,25 м.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Калмыков С.П., Есин В.М. Время обнаружения очага пожара // Пожаровзрывобезопасность/Fire and Explosion Safety. 2017. Т. 26. № 11. С. 52–63. DOI: 10.18322/PVB.2017.26.11.52-63
2. 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
3. Schiffliti R.P., Custer R.L.P., Meacham B.J. Design of detection systems // SFPE Handbook of Fire Protection Engineering, Chapter 40. 5th Edition. Society of Fire Protection Engineers. New York : Springer, 2016. Pp. 1314–1377. DOI: 10.1007/978-1-4939-2565-0
4. Zheng R., Cheng Yu., Lu S. Improved simulation method for optimizing optical chamber of photoelectric smoke detectors // 2016 IEEE/CSAA International Conference on Aircraft Utili-
- ty Systems (AUS). IEEE, 2016. DOI: 10.1109/AUS.2016.7748085
5. Müller K., Loepfe M., Wieser D. Optical simulation for fire detectors // Fire Safety Journal. 2006. Vol. 41. Issue 4. Pp. 274–278. DOI: 10.1016/j.fire-saf.2005.09.005
6. Fitzgerald R.W., Meacham B.J. Fire Detection // Fire Performance Analysis for Buildings. 2017. Pp. 193–202. DOI: 10.1002/9781118926321.ch11
7. Khrapskii S.F., Bedrina E.A. Fire detection system call points types selection based on the gas and smoke environment physical parameters dynamic study in different premises // Journal of Physics Conference Series. 2022. Vol. 2182. Issue 1. P. 012053. DOI: 10.1088/1742-6596/2182/1/012053
8. Hong Z., Tang Z., Pan H., Zhang Y., Zheng Z., Zhou R. et al. Active fire detection using a novel convolutional neural network based on Himawari-8 satellite images // Frontiers in Environmental Science. 2022. Vol. 10. P. 794028. DOI: 10.3389/fenvs.2022.794028

9. Su-Gil Choi, Jin-Se Young, Sang-Min Park, Yeong-Jae Nam, Si-Kuk Kim. Basic research on potential application of fire detection by measuring fire detection tendency of indoor air quality measurement factors // *Fire Science and Engineering*. 2020. Vol. 34. Issue 1. Pp. 37–46. DOI: 10.7731/KIFSE.2020.34.1.037
10. Anwar F., Bobby R.I., Rashid M.M., Alam M.M., Shaikh Z. Network-Based Real-time integrated Fire Detection and Alarm (FDA) system with building automation // *IOP Conference Series Materials Science and Engineering*. 2017. Vol. 260. Issue 1. P. 012025. DOI: 10.1088/1757-899X/260/1/012025
11. Кошмаров Ю.А., Пузач С.В., Андреев В.В., Козлов Ю.И. Прогнозирование опасных факторов пожара в помещении : учеб. пос. М. : АГПС МВД РФ, 2000. 126 с.
12. Абашкин А.А., Карпов А.В., Ушаков Д.В., Фомин М.В., Гилетич А.Н., Комков П.М. и др. Пособие по применению «Методики определения расчетных величин пожарного риска в зданиях, сооружениях и строениях различных классов функциональной пожарной опасности». М. : ВНИИПО, 2014. 226 с.
13. Rubini P., Evans A., Bressloff N. Simulation of Fire in Enclosures : user guide. Cranfield University, 2006.
14. Патанкар С. Численные методы решения задач теплообмена и динамика жидкостей. М. : Энергоатомиздат, 1984. 150 с.
15. Svobodová N., Benýšek M., Štefan R. Analysis of zone fire models and their application in structural fire design // *Diffusion and Defect Data Pt.B: Solid State Phenomena*. 2021. Vol. 322. Pp. 127–135. DOI: 10.4028/www.scientific.net/SSP.322.127
16. Blahova M., Hromada M. Principles for verification of mathematical fire models // 25th International Conference on Circuits, Systems, Communications and Computers (CSCC). IEEE, 2021. DOI: 10.1109/CSCC53858.2021.00027
17. McGrattan K., Hostikka S., Floyd J., McDermott R., Vanella M. NIST Special Publication 1018-1 // Sixth Edition Fire Dynamics Simulator. Technical Reference Guide. 2021. Vol. 1. DOI: 10.6028/NIST.SP.1018
18. McGrattan K., Miles S. Modeling fires using Computational Fluid Dynamics (CFD) // *SFPE Handbook of Fire Protection Engineering*. Chapter 32. Fifth Edition. Society of Fire Protection Engineers. 2016. Pp. 1034–1065. DOI: 10.1007/978-1-4939-2565-0
19. McGrattan K., McDermott R., Weinschenk C., Overholt K., Hostikka S., Floyd J. Fire dynamics simulator user's guide: NIST special publication 1019 // Sixth Edition. Gaithersburg : National Institute of Standards and Technology. 2013. 262 p.
20. Patankar S.V., Spalding D.B. A computer model for three-dimensional flow in furnaces // 14th Symp. (Int.) Combust. The Combustion Institute, Pittsburgh, PA. 1973. Pp. 605–614.
21. Hongjie Dong, Qi S. Zhang. Time analyticity for the heat equation and Navier-Stokes equations // *Journal of Functional Analysis*. 2020. Vol. 279. Issue 4. P. 108563. DOI: 10.1016/j.jfa.2020.108563
22. Самошин Д.А. Методологические основы нормирования безопасной эвакуации людей из зданий при пожаре : автореф. дис. ... д-ра тех. наук. М. : АГПС МЧС России, 2017. 22 с.

REFERENCES

1. Kalmykov S.P., Esin V.M. Fire detection time. *Pozharovzryvbezopasnost/Fire and Explosion Safety*. 2017; 26(11):52-63. DOI: 10.18322/PVB.2017.26.11.52-63 (rus).
2. 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).
3. Schifiliti R.P., Custer R.L.P., Meacham B.J. Design of detection systems. *SFPE Handbook of Fire Protection Engineering, Chapter 40. 5th Edition. Society of Fire Protection Engineers*. New York, Springer, 2016; 1314-1377. DOI: 10.1007/978-1-4939-2565-0
4. Zheng R., Cheng Yu., Lu S. Improved simulation method for optimizing optical chamber of photoelectric smoke detectors. *2016 IEEE/CSAA International Conference on Aircraft Utility Systems (AUS)*. IEEE, 2016. DOI: 10.1109/AUS.2016.7748085
5. Müller K., Loepfe M., Wieser D. Optical simulation for fire detectors. *Fire Safety Journal*. 2006; 41(4):274-278. DOI: 10.1016/j.firesaf.2005.09.005
6. Fitzgerald R.W., Meacham B.J. Fire Detection. *Fire Performance Analysis for Buildings*. 2017; 193-202. DOI: 10.1002/9781118926321.ch11
7. Khrapskii S.F., Bedrina E.A. Fire detection system call points types selection based on the gas and smoke environment physical parameters dynamic study in different premises. *Journal of Physics Conference Series*. 2022; 2182(1):012053. DOI: 10.1088/1742-6596/2182/1/012053
8. Hong Z., Tang Z., Pan H., Zhang Y., Zheng Z., Zhou R. et al. Active fire detection using a novel convolutional neural network based on Himawari-8 satellite images. *Frontiers in Environmental Science*. 2022; 10:794028. DOI: 10.3389/fenvs.2022.794028
9. Su-Gil Choi, Jin-Se Young, Sang-Min Park, Yeong-Jae Nam, Si-Kuk Kim. Basic research on potential application of fire detection by measuring fire detection tendency of indoor air quality measurement factors.

- Fire Science and Engineering*. 2020; 34(1):37-46. DOI: 10.7731/KIFSE.2020.34.1.037
10. Anwar F., Bobby R.I., Rashid M.M., Alam M.M., Shaikh Z. Network-based real-time integrated Fire Detection and Alarm (FDA) system with building automation. *IOP Conference Series Materials Science and Engineering*. 2017; 260(1):012025. DOI: 10.1088/1757-899X/260/1/012025
 11. Koshmarov Yu.A., Puzach S.V., Andreev V.V., Kozlov Yu.I. *Modeling and analysis of human movements in various buildings : textbook*. Moscow, State Fire Academy of Emercom of Russia Publ., 2000; 126. (rus).
 12. Abashkin A.A., Karpov A.V., Ushakov D.V., Fomin M.V., Gilech A.N., Komkov P.M. et al. *Manual on the application of "Methods for determining the calculated values of fire risk in buildings, structures and structures of various classes of functional fire hazard"*. Moscow, All-Russian Research Institute for Fire Protection of Emercom of Russia Publ., 2014; 226. (rus).
 13. Rubini P., Evans A., Bressloff N. *Simulation of Fire in Enclosures : user guide*. Cranfield University, 2006.
 14. Patankar S. *Numerical methods for solving problems of heat transfer and fluid dynamics*. Moscow, Energoatomizdat Publ., 1984; 150. (rus).
 15. Svobodová N., Benýšek M., Štefan R. Analysis of zone fire models and their application in structural fire design. *Diffusion and Defect Data Pt.B: Solid State Phenomena*. 2021; 322:127-135. DOI: 10.4028/www.scientific.net/SSP.322.127
 16. Blahova M., Hromada M. Principles for verification of mathematical fire models. *25th International Conference on Circuits, Systems, Communications and Computers (CSCC)*. IEEE, 2021. DOI: 10.1109/CSCC53858.2021.00027
 17. McGrattan K., Hostikka S., Floyd J., McDermott R., Vanella M. NIST Special Publication 1018-1. *Sixth Edition Fire Dynamics Simulator. Technical Reference Guide*. 2021; 1. DOI: 10.6028/NIST.SP.1018
 18. McGrattan K., Miles S. Modeling fires using Computational Fluid Dynamics (CFD). *SFPE Handbook of Fire Protection Engineering. Chapter 32. Fifth Edition. Society of Fire Protection Engineers*. 2016; 1034-1065. DOI: 10.1007/978-1-4939-2565-0
 19. McGrattan K., McDermott R., Weinschenk C., Overholt K., Hostikka S., Floyd J. Fire dynamics simulator user's guide: NIST special publication 1019. *Sixth Edition. Gaithersburg : National Institute of Standards and Technology*. 2013; 262.
 20. Patankar S.V., Spalding D.B. A computer model for three-dimensional flow in furnaces. *14th Symp. (Int.) Combust. The Combustion Institute, Pittsburgh, PA*. 1973; 605-614.
 21. Hongjie Dong, Qi S. Zhang. Time analyticity for the heat equation and Navier-Stokes equations. *Journal of Functional Analysis*. 2020; 279(4):108563. DOI: 10.1016/j.jfa.2020.108563
 22. Samoshin D.A. *Methodological bases of regulation of safe evacuation of people from buildings in case of fire : abstract dis. ... doctor of technical sciences*. Moscow, Acad. state fire service EMERCOM of Russia, 2017; 22. (rus).

Поступила 30.03.2022, после доработки 06.05.2022;

принята к публикации 10.06.2022

Received March 30, 2022; Received in revised form May 6, 2022;

Accepted June 10, 2022

Информация об авторе

КАЛМЫКОВ Сергей Петрович, 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, Россия, 129366, г. Москва, ул. Бориса Галушкина, 4; РИНЦ ID: 758175; ResearcherID: B-5446-2016; ORCID: 0000-0002-3444-086X; e-mail: k_sp@bk.ru

Information about the author

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

ПОЖАРОВЗРЫВБЕЗОПАСНОСТЬ/FIRE AND EXPLOSION SAFETY. 2022. Т. 31. № 4. С. 65–75
POZHAROVZRYVOBEZOPASNOST/FIRE AND EXPLOSION SAFETY. 2022; 31(4):65-75

ОБЗОРНАЯ СТАТЬЯ/REVIEW PAPER

УДК 614.842.615

<https://doi.org/10.22227/0869-7493.2022.31.04.65-75>

Оценка возможности использования различных средств пожаротушения в высотных зданиях

Михаил Владимирович Алешков¹, Олег Викторович Двоенко¹,
Андрей Сергеевич Гумиров^{1✉}, Артем Игоревич Соковнин¹,
Максим Вадимович Серегин², Игорь Олегович Семенюк²,
Сергей Георгиевич Цариченко³

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

² Служба пожаротушения Федеральной противопожарной службы Управления организации пожаротушения и проведения аварийно-спасательных работ, г. Москва, Россия

³ Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет, г. Москва, Россия

АННОТАЦИЯ

Введение. На сегодняшний день пожары в высотных объектах являются одной из существенных проблем, с которой сталкиваются подразделения пожарной охраны. Уникальные объекты требуют специального подхода с точки зрения обеспечения пожарной безопасности и тушения пожара. Важнейшей задачей является обеспечение подачи огнетушащих веществ на высоту с использованием современных пожарно-технических средств и установок. Этому вопросу и посвящен настоящий обзор.

Материалы и методы. Проведение экспериментальных исследований в рамках научно-тактических учений на крыше башни «Neva Towers» с целью оценки возможности подачи огнетушащих веществ различными способами на высоту. Рассматривались следующие способы подачи на высоту: с использованием оборудования контейнера для высотного пожаротушения, от установки с технологией получения компрессионной пены, с помощью установки гидроабразивной резки «Кобра».

Теоретические основы. Разработана методология проведения комплексных экспериментальных исследований возможности развертывания и подачи различных технических средств пожаротушения в высотных зданиях с привлечением штатной группировки сил и средств пожарной охраны г. Москвы.

Результаты и обсуждения. В результате научно-тактических учений была доказана эффективность применения новых установок пожаротушения с подачей компрессионной пены, а также установки с технологией гидроабразивной резки «Кобра». Удалось обеспечить подачу на высоту 345 м.

Выводы. На сегодняшний день с помощью новых технологий пожаротушения экспериментально доказано, что их применение наиболее эффективно по сравнению с «традиционными» методами подачи огнетушащих веществ. В дальнейшем необходимо проведение более детальных исследований гидродинамических параметров насосно-рукавных систем с целью разработки рекомендаций для предварительного планирования действий сил и средств пожарно-спасательных подразделений.

Ключевые слова: компрессионная пена; насосно-рукавная система; подача на высоту; установка пожаротушения с гидроабразивной резкой; мотопомпа

Для цитирования: Алешков М.В., Двоенко О.В., Гумиров А.С., Соковнин А.И., Серегин М.В., Семенюк И.О., Цариченко С.Г. Оценка возможности использования различных средств пожаротушения в высотных зданиях // Пожаровзрывобезопасность/Fire and Explosion Safety. 2022. Т. 31. № 4. С. 65–75. DOI: 10.22227/0869-7493.2022.31.04.65-75

✉ Гумиров Андрей Сергеевич, e-mail: romb55cool2014@yandex.ru

Assessment of the possibility of using various fire extinguishing means in high-rise buildings

Mikhail V. Aleshkov¹, Oleg V. Dvoenko¹, Andrey S. Gumirov^{1✉}, Artem I. Sokovnin¹,
Maxim V. Seregin², Igor O. Semenyuk², Sergey G. Tsarichenko³

¹ The State Fire Academy of the Ministry of Russian Federation for Civil Defense, Emergencies and Elimination on Consequences of Natural Disasters, Moscow, Russian Federation

² Fire Extinguishing Service of the Federal Fire Service of the Department of Organization of Fire Extinguishing and Emergency Rescue Operations, Moscow, Russian Federation

³ Moscow State University of Civil Engineering (National Research University), Moscow, Russian Federation

ABSTRACT

Introduction. To date, fires in high-rise buildings are one of the significant problems faced by fire protection units. Unique objects require a special approach in terms of fire safety and fire extinguishing. The most important task is to ensure the supply of extinguishing agents to the height using modern fire-fighting equipment and installations.

Materials and methods. In September 2021, to conduct experimental scientific and tactical exercises on the roof of the Neva Towers tower, a program and methodology for supplying fire extinguishing agents in various ways to the height were developed. The following methods of feeding to height were considered: deployment using the equipment of a container for high-altitude firefighting, feeding from an installation with compression foam technology, feeding using a waterjet cutting unit "Cobra".

Theoretical bases. A theoretical assessment of the possibility of supplying extinguishing agents to a height with the help of new fire-rescue equipment confirmed the need for experimental scientific and tactical exercises on the roof of the Neva Towers tower.

Results and discussions. As a result of the scientific and tactical exercises, the effectiveness of the use of new fire extinguishing systems with compression foam supply, as well as installations with waterjet cutting technology "Cobra" was proved. It was possible to provide a feed to a height of 350 m.

Conclusions. To date, with the help of new fire extinguishing technologies, it has been experimentally proven that their use is most effective compared to "traditional" methods of supplying extinguishing agents. In the future, it is necessary to conduct more detailed studies of the hydrodynamic parameters of pumping and bag systems in order to develop recommendations for preliminary planning of the actions of forces and means of fire and rescue units.

Keywords: compression foam; pump-bag system; feeding to height; fire extinguishing installation with waterjet cutting; motor pump

For citation: Aleshkov M.V., Dvoenko O.V., Gumirov A.S., Sokovnin A.I., Seregin M.V., Semenyuk I.O., Tsarichenko S.G. Assessment of the possibility of using various fire extinguishing means in high-rise buildings. *Pozharovzryvbezopasnost/Fire and Explosion Safety*. 2022; 31(4):65-75. DOI: 10.22227/0869-7493.2022.31.04.65-75 (rus).

✉ Andrey Sergeevich Gumirov, e-mail: romb55cool2014@yandex.ru

Введение

Многие города мира сегодня сталкиваются с необходимостью увеличения темпов высотного строительства. Это позволяет решать ряд вопросов социального и экономического характера, предоставлять дополнительные площади в условиях точечной застройки мегаполисов. Однако среди большого количества положительных аспектов высотного строительства возникает существенная проблема обеспечения пожарной безопасности и тушения пожаров на этих объектах [1].

Анализ международной статистики позволяет говорить, что пожары в высотных зданиях в последние годы становятся не редкостью. Среди наиболее крупных и резонансных пожаров можно выделить [2]:

- пожар, произошедший 6 декабря 2004 г. в городе Чикаго в 45-этажном здании Национального Банка. В тушении были задействованы треть личного состава и техники. Пострадали более 30 человек;
- пожар в Мадриде 13 февраля 2005 г., где огонь практически полностью уничтожил 32-этажный небоскреб «Виндзор». В ходе тушения пожара пострадали семь огнеборцев;
- сильный пожар в столице Объединенных Арабских Эмиратов 19 октября 2009 г. Загорелась строящаяся высотка в фешенебельном районе «Город Солнца». На месте возгорания работали несколько десятков пожарных автомобилей. Рабочих, которые проводили строительные работы, эвакуировали с помощью вертолетов;

- 2 апреля 2012 г. загорелась башня «Восток» комплекса «Федерация» в деловом центре «Москва-Сити» в российской столице. Огонь распространился на два этажа — 66 и 67-й. Площадь пожара составила 300 м². Огонь ликвидировали силами 20 пожарных расчетов и 4 вертолетов;
- пожар 20 июля 2016 г. в 75-этажном здании небоскреба «Sulafa Tower» в Дубае, где огнем было охвачено больше 20 этажей. Благодаря слаженной работе пожарных и спасательных служб жертв удалось избежать (рис. 1).

Приведенные примеры наглядно демонстрируют всю опасность и сложность процесса спасения людей и тушения пожаров на подобных объектах. Большое количество научно-технических институтов и управлений работают сейчас по разработке новых норм, стандартов и правил в области конструктивных, градостроительных, противопожарных решений [3].

Несмотря на принимаемые нормативно-технические меры, современные системы пожарной автоматики и тушения, по-прежнему основными тактическими единицами борьбы с огнем и эвакуации людей являются личный состав пожарно-спасательных подразделений и мобильные средства пожаротушения.

Для организации работ по тушению высотных зданий необходимо выполнение следующих условий. Во-первых, происходит предварительное планирование действий пожарно-спасательных подразделений



Рис. 1. Пожары в высотных зданиях: *a* — Мадрид; *b* — Абу-Даби; *c* — Москва; *d* — Дубай

Fig. 1. Fires in high-rise buildings: *a* — Madrid; *b* — Abu Dhabi; *c* — Moscow; *d* — Dubai

по организации тушения пожаров на конкретном объекте. Анализируются возможные способы и пути эвакуации людей, тщательно выбираются маршруты подъезда и установки высотных механизмов.

Во-вторых, проводится анализ тактико-технических возможностей пожарно-спасательной техники гарнизона по подаче огнетушащих веществ на предельно возможную высоту за кратчайший промежуток времени.

Учитывая перечисленные сложности, требуется выработка системного подхода к организации и тактике тушения пожаров в высотных зданиях и разработке и применению мобильных средств пожаротушения. При этом особое внимание необходимо уделять выбору средств пожаротушения, от эффективности применения которых во многом зависит результат успешного пожаротушения. Этой проблеме и посвящен настоящий обзор.

Экспериментальное исследование

В России лидером среди городов с наибольшим количеством высотных зданий является Москва. Особое внимание уделяется комплексу высотных сооружений делового центра «Москва-Сити». Уникальные объекты требуют специального подхода с точки зрения обеспечения пожарной безопасности и тушения пожара. Для отработки системного под-

хода по применению различных способов пожаротушения наряду с теоретическими необходимы результаты практических исследований. С этой целью в сентябре 2021 г. были проведены экспериментальные научно-технические учения в башне «Neva Towers». Основной целью эксперимента являлась оценка возможности подачи огнетушащих составов и определение временных параметров развертывания пожарно-спасательных подразделений на крыше здания высотой в 345 м тремя способами с использованием:

- 1) контейнерного оборудования для высотного пожаротушения;
- 2) компрессионной пены;
- 3) водяного пожаротушения высокого давления с использованием установки гидроабразивной резки «Кобра».

В учениях приняли участие сотрудники и работники ГУ МЧС России по г. Москве, Департамента ГОЧС и ПБ по г. Москве и Академии ГПС МЧС России.

Традиционным способом подачи огнетушащих веществ на высоту является подача в перекачку с использованием переносных пожарных мотопомп [4] (рис. 2).

Особенностью контейнера является наличие в нем передвижных модулей с комплектом пожарных напорных рукавов и мотопомпой. Благодаря своей



a



b

Рис. 2. Пожарный контейнер с пожарным оборудованием**Fig. 2.** Fire container with fire equipment

конструкции модули могут быстро перемещаться по твердой поверхности и доставляться на различные этажи с помощью пожарных лифтов, где происходит их дальнейшее развертывание (рис. 3).

Вторым способом обеспечения тушения на высоте является применение компрессионной пены, подаваемой по рукавным линиям, применение которой существенно повышает эффективность пожаротушения, расширяя тактические возможности оперативных подразделений [5].

Основным принципом построения установок получения и подачи компрессионной пены, применяемой для тушения высотных зданий, является то, что образование пены происходит на выходе из насосной установки в результате смешивания сразу трех компонентов: воды, поверхностно-активного вещества (пенообразователя) и воздуха. Воздух под давлением подается в камеру генерации пены от воздушного компрессора или специальных баллонов, после чего уже в готовом виде пена подается в пожарные напорные рукава [6–10].

В результате по рукавам движется газоводяная смесь — готовая пена, плотность которой существенно меньше плотности раствора пенообразователя, применяемого в традиционных пенных системах. Кроме того, реология течения пены по рукавам отличается от потока воды, обладая меньшим гидравлическим сопротивлением. Все это обеспечивает возможность подачи компрессионной пены на большую высоту для тушения высотных пожаров [11]. При этом в случае с компрессионной пеной кратность может регулироваться в широких пределах от 2 до 20 за счет вариации количества воздуха, подаваемого в камеру пеносмешения. Это также обеспечивает возможность управлять режимами подачи пены на различную высоту и выбора кратности пены для тушения пожаров твердых веществ (класс А) и горючих жидкостей (класс В) [11–13]. Для подачи компрессионной пены в очаг пожара используются стволы с простым гладким насадком, что обеспечивает компактную форму струи, обладающей большей кинетической энергией и дальней подачей [14–16].



a



b

Рис. 3. Транспортировка и развертывание мотопомп**Fig. 3.** Transportation and deployment of motor pumps

Объектом для экспериментальных исследований возможности подачи на высоту являлась установка получения и подачи компрессионной пены, установленная на пожарной автоцистерне АЦ 3,2-40/4 на базовом шасси КАМАЗ 43253. Развертывание магистральной линии пожарных напорных рукавов диаметром DN65 по маршевой лестнице и подача компрессионной пены представлены на рис. 4.

При проведении испытаний удалось выделить ряд тактико-технических преимуществ применения компрессионной пены при тушении на высоте:

- структура пены при выходе из пожарного ствола имеет однородную структуру, обладающую хорошей адгезионной способностью;
- в компрессионной пене практически отсутствует пенообразователь в остаточной жидкой фазе, что приводит к его экономии;
- возможность подачи на высоту до 350 м по магистральным рукавным линиям;

- возможность свободного маневрирования ствольщика при тушении пожара из-за низкого веса рукавной линии с компрессионной пеной;
- относительно меньшая масса рукавной линии по сравнению с подачей водных растворов пенообразователя.

Третьим способом подачи огнетушащих веществ на крышу башни «Neva Towers» стало использование установки водяного пожаротушения высокого давления гидроабразивной резки «Кобра». При использовании этой системы положительный результат в локализации и тушении очага достигается за счет непосредственного взаимодействия мелких капелек воды с пламенем, в результате чего происходит охлаждение зоны горения с одновременным парообразованием [17, 18]. Применение установки гидроабразивной резки позволяет осуществлять тушение закрытых помещений без их предварительного вскрытия с безопасной позиции с внешней стороны помещения, что обеспечивает снижение влияния опасных факторов пожара на личный состав. Подача



a



b

Рис. 4. *a* — развертывание магистральной линии по лестничным маршам; *b* — подача компрессионной пены на крышу башни «Neva Towers» делового центра «Москва-Сити»

Fig. 4. *a* — the deployment of the main line along the staircases; *b* — the supply of compression foam to the roof of the Neva Towers tower of the Moscow City business center



a



b

Рис. 5. *a* — транспортировка катушки со шлангом высокого давления; *b* — подача огнетушащих веществ с помощью ствола «Кобра»

Fig. 5. *a* — transportation of a coil with a high-pressure hose; *b* — the supply of fire extinguishing agents using the “Cobra” barrel

воды происходит с расходом до 60 л/мин при давлении 300 атм [19, 20].

В ходе проведения эксперимента происходило развертывание рукавной линии высокого давления по лестничным маршам с последующим вскрытием конструкций из металла и дерева и тушением (рис. 5).

Применение установки «Кобра» доказало свою эффективность для подачи огнетушащих средств на высоту.

Результаты и выводы по проведенному эксперименту

В результате проведенных экспериментальных исследований были получены данные, подтверждающие возможность применения заявленных способов пожаротушения на заданную высоту 345 м.

В ходе проведения эксперимента наиболее быстрым по времени развертывания оказался первый способ перекачки с использованием переносных мотопомп, время развертывания составило 45 мин без подачи огнетушащих веществ, что было обусловлено использованием пожарных лифтов.

Второй и третий способ — с подачей компрессионной пены и использованием установки гидроабразивной резки — обеспечили практически одинаковое время развертывания и подачи огнетушащих веществ, что составило чуть более 60 мин.

Стоит отметить, что, в случае отсутствия возможности использования пожарных лифтов на объекте, развертывание будет происходить по лестничным маршам, и в данном случае второй и третий способы будут более предпочтительными [21].

Для обоснования выбора технических средств, обеспечивающих подачу огнетушащих веществ на высоту, необходимо руководствоваться тремя основными положениями.

1. Технические возможности средств подачи огнетушащих веществ должны быть равны либо превышать требуемую высоту подачи.
2. Реализация функции минимального времени боевого развертывания.
3. Эффективность применения выбранного способа и средства пожаротушения для локализации и ликвидации пожара.

Основное принципиальное положение, которое должно выполняться, — это обеспечение техническими средствами для подачи огнетушащих средств на необходимую высоту. Если не выполняется данное положение, то нет необходимости рассматривать два последующих, а сами технические средства, реализующие способ подачи огнетушащих веществ на высоту, не учитывать.

Второе и третье положение должны рассматриваться как обоснование выбора технических средств, которое позволит реализовать наиболее эффективный способ (с точки зрения сокращения времени развертывания и привлечения личного состава) подачи огнетушащих средств в зону горения. В общем виде эффективность можно записать как реализацию двух функций:

$$\begin{aligned} F(X) &\rightarrow \min, \\ T(X) &\rightarrow \max, \end{aligned} \quad (1)$$

где $F(X)$ — функция времени боевого развертывания, которая зависит от выбора способа подачи огнетушащих средств на высоту; $T(X)$ — функция тактических возможностей по тушению пожара, которая зависит от выбора способа подачи огнетушащих средств на высоту.

Рассматривая первый способ подачи огнетушащих веществ на высоту, обеспечивающийся пожарными мотопомпами, можно сделать вывод, что высота подачи огнетушащих средств физически ограничена только количеством мотопомп, задействованных в организации подачи огнетушащих веществ.

В работе [22] представлены результаты исследований по разработке численной модели оценки продолжительности развертывания сил и средств при тушении пожаров в строящихся высотных зданиях. Используя полученные экспериментальные данные, была выведена эмпирическая зависимость, позволяющая оценить время боевого развертывания при использовании первого способа в условиях, когда мотопомпы необходимо поднимать вручную (лифт выведен из строя):

$$F(X) = 0,0037x^2 + 0,1025x, \quad (2)$$

где x — высота подъема мотопомпы или рукавной линии, м.

Таким образом, в случае отсутствия или не работоспособности пожарных лифтов на объекте защиты расчет затрат времени на реализацию первого способа подачи огнетушащих веществ составит более 5 ч, что говорит о необходимости реализации альтернативных способов подачи огнетушащих веществ.

Второй и третий способ имеют преимущества в сравнении с первым в части боевого развертывания, так как в данном случае прокладывается только рукавная линия до места подачи огнетушащего вещества. Расчетное время боевого развертывания возможно определить по эмпирической зависимости:

$$F(X) = 0,00004x^2 + 0,0892x. \quad (3)$$

Расчетное время прокладки рабочей линии для реализации второго и третьего способа составит 78,4 мин, что на порядок меньше в сравнении с первым способом, но при этом также занимает значительное время. Очевидно, что для обеспечения оперативного развертывания установок пожаротушения с использованием высокого давления и компрессионной пены необходимо предусмотреть оснащение высотных зданий системами сухотрубов, что исключает необходимость прокладки рукавной магистральной линии.

В случае рассмотрения второго и третьего способа возникает вопрос об определении границ возможности подачи огнетушащих веществ на высоту.

В настоящее время не существует расчетной модели, которая описывает движение компрессионной пены по вертикально проложенной рукавной системе, нет количественных гидравлических характеристик данного двухфазного потока. На данный момент существует лишь экспериментальное подтверждение самого факта возможности подачи компрессионной пены на высоту более 345 м, что обуславливает необходимость более глубокого изучения данного вопроса, а именно влияние процесса стратификации и разрушения при вертикальном движении двухфазного потока и определение его гидравлических характеристик.

Оценить границы применения третьего способа подачи огнетушащего вещества возможно на основании результатов, полученных в исследовании [23], где на основе натурных испытаний определены ключевые параметры для расчета насосно-рукавных систем, потеря напора при подаче двухфазного потока в виде смеси воды и абразивных частиц по вертикали, а также коэффициент гидравлического сопротивления. В основе определения предельной возможной высоты лежит условие, что давление на стволе должно быть не менее 22 МПа. Давление на подающем насосе (уровень земли) составляет 30 МПа, таким образом, исходя из постановки задачи допустимые потери на преодоление сопротивления рукавной линии должны составлять менее 8 МПа.

В отличие от моделирования движения однофазной системы (вода), в рассматриваемых двухфазных системах возникают дополнительные потери напора из-за наличия твердой фазы:

$$i_{\text{см}} = i_0 \frac{\rho_{\text{см}}}{\rho_0} + \Delta i, \quad (4)$$

где i_0 — удельные потери напора при движении воды, м; $\rho_{\text{см}}$ — плотность смеси; ρ_0 — плотность воды; Δi — дополнительные потери напора, учитывающие вторую фазу, м.

Дополнительные потери потока, учитывающие вторую фазу (Δi), определяют с помощью следующего выражения:

$$\Delta i = \delta \sqrt{j^3} \sqrt{C_0^2} \frac{V_{\text{кр}}}{V}, \quad (5)$$

где δ — коэффициент, учитывающий влияние относительной крупности частиц по отношению к диаметру трубы d/D ; j — коэффициент разнотерности твердых частиц; C_0 — действительная объемная консистенция, Н/м³; $V_{\text{кр}}$ — критическая скорость движения смеси, при которой частицы начинают двигаться вдоль потока, м/с; V — скорость потока, м/с.

Величина i_0 (4) обуславливает точность оценки значений $i_{\text{см}}$ и зависит от режима движения воды и поверхности труб, которые характеризуются коэффициентом гидравлического трения λ .

В исследовании [24] экспериментальным путем был определен коэффициент гидравлического трения, значение которого составляет 0,019.

Соответственно, зная значение коэффициента гидравлического трения, возможно оценить потери напора по формуле Дарси – Вейсбаха:

$$h_{\text{т}} = \lambda \frac{l}{d} \frac{V^2}{2g}. \quad (6)$$

Таким образом, основываясь на рассмотренных теоретических исследованиях, делаем вывод, что предельная подача огнетушащей смеси с помощью установки гидроабразивной резки «Кобра» составит 290 м по вертикали.

Результаты проведенных экспериментальных исследований свидетельствуют о возможности подачи гидроабразивной смеси на высоту 345 м и выполнения операций по вскрытию конструкций и тушению условного пожара. Но так как целью данных исследований являлся факт подачи двухфазной смеси с помощью установки гидроабразивной резки «Кобра» на высоту, то факт полученных различий теоретических и экспериментальных результатов является темой дальнейших исследований по изучению процессов функционирования установок с подачей гидроабразивной смеси, что позволит выполнить верификацию расчетной модели потери давления при течении двухфазового потока, изложенной в работе [25], и сформировать дополнительные методические рекомендации.

Заключение

Подводя итоги, можно утверждать, что современные технологии пожаротушения позволя-

ют обеспечивать тушение пожаров в высотных зданиях. Однако необходимо проведение более детальных исследований технических и гидродинамических характеристик насосно-рукавных систем и средств подачи с целью формирования рекомендаций для предварительного планирования сил и средств. Каждая из рассматриваемых технологий пожаротушения будет иметь свою целесообразность применения, с учетом специфика

ки объекта защиты и тактических действий подразделений реагирования.

Учитывая результаты по расчету необходимого времени на боевое развертывание систем подачи огнетушащих веществ на подобные объекты, целесообразно рассмотреть необходимость монтажа систем сухотрубов для подключения мобильных установок пожаротушения, а также размещение на этажах системы катушек со шлангами высокого давления для транспортировки гидроабразивной смеси.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Лазуренко А.А., Николаев А.Н., Шмырева М.Б. Современные проблемы тушения пожаров в зданиях повышенной этажности и высотных зданиях // Проблемы обеспечения безопасности при ликвидации последствий чрезвычайных ситуаций. 2018. Т. 1. С. 813–816. URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=12513091>
2. 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. URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=21504585>
3. Подгушный А.В., Денисов А.Н., Хонг Ч.Д. Современные проблемы тушения пожаров в зданиях повышенной этажности и высотных зданиях // Пожаровзрывобезопасность / Fire and Explosion Safety. 2007. Т. 16. № 6. С. 53–57. URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=12513091>
4. Малыхин А.В. Пожарные мотопомпы нового поколения // Вестник Восточно-Сибирского института Министерства внутренних дел России. 2013. № 1 (64). С. 59–70. URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=23637237>
5. Камлюк А.Н., Навроцкий О.Д., Грачулин А.В. Тушение пожаров пеногенерирующими системами со сжатым воздухом // Вестник Университета гражданской защиты МЧС Беларуси. 2017. Т. 1. № 1. С. 44–53. URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=28904246>
6. Алешков М.В. Особенности тушения крупных пожаров на территории Российской Федерации при внешнем воздействии опасных природных явлений // Пожаровзрывобезопасность / Fire and Explosion Safety. 2013. № 5. С. 59–63. URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=19419643>
7. Brinkley J., Depew R. Capabilities and limitations of compressed air foam systems (CAFS) for structural firefighting. Quincy, MA : Fire Protection Research Foundation, 2012. 58 p.
8. Kim A.K., Crampton G.P. Evaluation of the fire suppression effectiveness of manually applied compressed-air-foam (CAF) system // Fire Technology. 2012. Vol. 48. Issue 3. Pp. 549–564. DOI: 10.1007/s10694-009-0119-3
9. Алешков М.В., Ройтман В.М., Воевода С.С., Молчанов В.П., Шарипханов С.Д., Федяев В.Д. Применение компрессионной пены при тушении пожаров в зданиях повышенной этажности // Пожары и чрезвычайные ситуации: предотвращение, ликвидация. 2019. № 3. С. 59–62. DOI: 10.25257/FE.2019.3.59-62
10. Rie D.H., Lee J.W., Kim S. Class B fire-extinguishing performance evaluation of a compressed air foam system at different air-to-aqueous foam solution mixing ratios // Applied Sciences. 2016. Vol. 6. Issue 7. P. 191. DOI: 10.3390/app6070191
11. Cheng J., Xu M. Experimental research of Integrated Compressed Air Foam System of Fixed (ICAF) for Liquid Fuel // Procedia Engineering. 2014. Vol. 71. Pp. 44–56. DOI: 10.1016/J.PROENG.2014.04.007
12. Гумиров А.С., Молчанов В.П., Федяев В.Д., Стругов А.О. Исследование параметров массового расхода при подаче по насосно-рукавным системам компрессионной пены // Пожары и чрезвычайные ситуации: предотвращение и ликвидация. 2020. № 4. С. 5–9. DOI: 10.25257/FE.2020.4.5-10
13. Lee J.-W., Lim W.-S., Rie D.-H. A study on B class fire extinguishing performance of air ratio in the compressed air foam system // Journal of Korean Institute of Fire Science and Engineering. 2013. Vol. 27. Issue 6. Pp. 8–14. DOI: 10.7731/kifse.2013.27.6.008
14. Lee J.-W., Lim W.-S., Kim S.-S., Rie D.-H. A study on fire extinguishing performance evaluation of compressed air foam system // Journal of Korean Institute of Fire Science and Engineering. 2012. Vol. 26. Issue 5. Pp. 73–78. DOI: 10.7731/kifse.2012.26.5.073
15. Cheng J., Xu M. Experimental research of Integrated Compressed Air Foam System of Fixed (ICAF) for liquid fuel // Procedia Engineering. 2014. Vol. 71. Pp. 44–56. DOI: 10.1016/j.proeng.2014.04.007
16. Parikh D. Experimental study of pressure drop and bubble size in a laboratory scale compressed air foam generation system. 2017.
17. US 2010/0126738 A1 [P]. Compressed air foam technology : U.S.A. / T. Kruger, G. Dorau. 02.05.2010.

18. Орехова Н.С. Система безопасности ММДЦ «Москва-Сити» // Пожарная безопасность в строительстве. 2010. № 1. С. 48–51.
19. Камлюк А.Н., Грачулин А.В. Особенности применения пеногенерирующих систем со сжатым воздухом для тушения пожаров // Вестник Университета гражданской защиты МЧС Беларуси. 2018. Т. 2. № 2. С. 168–175. URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=35017754>
20. Алешков М.В., Гусев И.А. Определение рабочих параметров установок пожаротушения с возможностями гидроабразивной резки, применяемых на объектах энергетики // Пожаровзрывобезопасность/ Fire and Explosion Safety. 2017. Т. 26. № 10. С. 69–76. DOI: 10.18322/PVB.2017.26.10.69-76
21. Алешков М.В., Безбородько М.Д., Гусев И.А. Применение установок пожаротушения с системами гидроабразивной резки на объектах атомной энергетики // Пожары и чрезвычайные ситуации: предотвращение, ликвидация. 2016. № 4. С. 7–12. DOI: 10.25257/FE.2016.4.7-12
22. 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. 2019. № 3 (96). С. 42–46. URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=39707128>
23. Семенов Р.А., Коришунов И.В. Об оценке продолжительности развертывания сил и средств при тушении пожаров в строящихся высотных зданиях // Технологии техносферной безопасности. 2016. № 2 (66). С. 120–127. URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=28795427>
24. Волгина Л.В., Гусев И.А. Экспериментальное исследование потерь напора при движении двухфазного потока в вертикальных трубах // Гидротехническое строительство. 2021. № 11. С. 29–33.
25. Ebrahimi-Mamaghani A., Sotudeh-Gharebagh R., Zarghami R., Mostoufi N. Dynamics of two-phase flow in vertical pipes // Journal of Fluids and Structures. 2019. Vol. 87. Pp. 150–173. DOI: 10.1016/J.JFLUIDSTRUCTS.2019.03.010

REFERENCES

1. Lazurenko A.A., Nikolaev A.N., Shmyreva M.B. Modern problems of extinguishing fires in high-rise buildings and high-rise buildings. *Problems of Ensuring Safety in the Aftermath of Emergencies*. 2018; 1:813-816. URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=12513091> (rus).
2. 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. URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=21504585> (rus).
3. Podgrushny A.V., Denisov A.N., Hong Ch.D. Modern problems of extinguishing fires in high-rise buildings and high-rise buildings. *Pozharovzryvobezopasnost/Fire and Explosion Safety*. 2007; 16(6):53-57. URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=12513091> (rus).
4. Malykhin A.V. Fire engine pumps of a new generation. *Vestnik of the East Siberian Institute of the MIA of Russia*. 2013; 1(64):59-70. URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=23637237> (rus).
5. Kamlyuk A.N., Navrotsky O.D., Grachulin A.V. Extinguishing fires with foam generating systems with compressed air. *Bulletin of the University of Civil Protection of the Ministry of Emergency Situations of Belarus*. 2017; 1(1):44-53. URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=28904246> (rus).
6. Aleshkov M.V. Peculiarities of extinguishing large-scale fires on the territory of the Russian federation under the external effect of hazardous natural phenomena. *Pozharovzryvobezopasnost/Fire and Explosion Safety*. 2013; 5:59-63. URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=19419643> (rus).
7. Brinkley J., Depew R. *Capabilities and limitations of compressed air foam systems (CAFS) for structural firefighting*. Quincy, MA : Fire Protection Research Foundation, 2012; 58.
8. Kim A.K., Crampton G.P. Evaluation of the fire suppression effectiveness of manually applied compressed-air-foam (CAF) system. *Fire Technology*. 2012; 48(3):549-564. DOI: 10.1007/s10694-009-0119-3
9. Aleshkov M.V., Roitman V.M., Voevoda S.S., Molchanov V.P., Sharipkhanov S.D., Fedyaev V.D. The use of compression foam when extinguishing fires in high-rise buildings. *Fires and Emergencies: Prevention, Liquidation*. 2019; 3:59-62. DOI: 10.25257/FE.2019.3.59-62 (rus).
10. Rie D.H., Lee J.W., Kim S. Class B fire-extinguishing performance evaluation of a compressed air foam system at different air-to-aqueous foam solution mixing ratios. *Applied Sciences*. 2016; 48(3):549-564. DOI: 10.3390/app6070191
11. Cheng J., Xu M. Experimental research of Integrated Compressed Air Foam System of Fixed (ICAF) for liquid fuel. *Procedia Engineering*. 2014; 71:44-56. DOI: 10.1016/J.PROENG.2014.04.007
12. Gumirov A.S., Molchanov V.P., Fedyaev V.D., Strugov A.O. Analysis of mass flow parameters while delivering compressed air foam through pump-and-hose systems. *Fires and Emergencies: Prevention, Liquidation*. 2020; 4:5-9. DOI: 10.25257/FE.2020.4.5-10 (rus).
13. Lee J.W., Lim W.S., Rie D.H. A study on B class fire extinguishing performance of air ratio in the compressed air foam system. *Fire Science and Engineering*. 2013; 27(6):8-14. DOI: 10.7731/kifse.2013.27.6.008

14. Lee J.-W., Lim W.-S., Kim S.-S., Rie D.-H. A study on fire extinguishing performance evaluation of compressed air foam system. *Fire Science and Engineering*. 2012; 26(5):73-78. DOI: 10.7731/kifse.2012.26.5.073
15. Cheng J., Xu M. Experimental research of Integrated Compressed Air Foam System of Fixed (ICAF) for liquid fuel. *Procedia Engineering*. 2014; 71:44-56. DOI: 10.1016/j.proeng.2014.04.007
16. Parikh D. *Experimental study of pressure drop and bubble size in a laboratory scale compressed air foam generation system*. 2017.
17. US 2010/0126738 A1 [P]. Compressed air foam technology : U.S.A. Tino Kruger, Gonter Dorau. May 2, 2010.
18. Orekhova N.S. The security system of MMDC "Moscow City". *Fire Safety in Construction*. 2010; 1:48-51. (rus).
19. Kamlyuk A.N., Grachulin A.V. Particularities of extinguishing by compressed air foam systems. *Bulletin of the University of Civil Protection of the Ministry of Emergency Situations of Belarus*. 2018; 2(2):168-175. URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=35017754> (rus).
20. Aleshkov M.V., Gusev I.A. Determination of the operating parameters of fire extinguishing installations with waterjet cutting capabilities used at energy facilities. *Pozharovzryvobezopasnost/Fire and Explosion Safety*. 2017; 26(10):69-76. DOI: 10.18322/PVB.2017.26.10.69-76 (rus).
21. Aleshkov M.V., Bezborodko M.D., Gusev I.A. The use of fire extinguishing installations with water jet cutting systems at power engineering facilities. *Fires and Emergencies: Prevention, Liquidation*. 2016; 4:7-12. DOI: 10.25257/FE.2016.4.7-12 (rus).
22. Gordienko D.M., Pavlov E.V., Osipov Yu.N., Ershov V.I., Panfilova E.V. Problems of using compression foam to extinguish fires in high-rise buildings with the use of unmanned aircraft systems. *Fire Safety*. 2019; 3(96):42-46. URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=39707128> (rus).
23. Semenov R.A., Korshunov I.V. About assessment of duration of forces and means expansion in case of suppression of the fires in high rise buildings under construction. *Technosphere Safety Technologies*. 2016; 2(66):120-127. URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=28795427> (rus).
24. Volgina L.V., Gusev I.A. Experimental study of pressure losses during the movement of a two-phase flow in vertical pipes. *Gidrotekhnicheskoe Stroitel'stvo*. 2021; 11:29-33. (rus).
25. Ebrahimi-Mamaghani A., Sotudeh-Gharebagh R., Zarghami R., Mostoufi N. Dynamics of two-phase flow in vertical pipes. *Journal of Fluids and Structures*. 2019; 87:150-173. DOI: 10.1016/J.JFLUID-STRUCTS.2019.03.010

Поступила 24.01.2022, после доработки 27.06.2022;
принята к публикации 22.07.2022

Received January 24, 2022; Received in revised form June 27, 2022;
Accepted July 22, 2022

Информация об авторах

АЛЕШКОВ Михаил Владимирович, д-р техн. наук, профессор, заместитель начальника, Академия Государственной противопожарной службы Министерства Российской Федерации по делам гражданской обороны, чрезвычайным ситуациям и ликвидации последствий стихийных бедствий, Россия, 129366, г. Москва, ул. Бориса Галушкина, 4; РИНЦ ID: 766510; ORCID: 0000-0001-7844-1955; e-mail: aleshkov.m@mail.ru

ДВОЕНКО Олег Викторович, канд. техн. наук, доцент кафедры пожарной техники в составе Учебно-научного комплекса пожарной и аварийно-спасательной техники, Академия Государственной противопожарной службы Министерства Российской Федерации по делам гражданской обороны, чрезвычайным ситуациям и ликвидации последствий стихийных бедствий, Россия, 129366, г. Москва, ул. Бориса Галушкина, 4; РИНЦ ID: 772016; ORCID: 0000-0002-0436-4974; e-mail: dvoenko_oleg@mail.ru

ГУМИРОВ Андрей Сергеевич, адъюнкт факультета подготовки научно-педагогических кадров, Академия Государственной противопожарной службы Министерства Российской Федерации по делам гражданской

Information about the authors

Mikhail V. ALESHKOV, Dr. Sci. (Eng.), Professor, Deputy Head, the State Fire Academy of the Ministry of Russian Federation for Civil Defense, Emergencies and Elimination on Consequences of Natural Disasters, Borisa Galushkina St., 4, Moscow, 129366, Russian Federation; ID RISC: 766510; ORCID: 0000-0001-7844-1955; e-mail: aleshkov.m@mail.ru

Oleg V. DVOENKO, Cand. Sci. (Eng.), Associate Professor of the Department of Fire Engineering as Part of the Scientific Complex of Fire and Rescue Equipment, the State Fire Academy of the Ministry of Russian Federation for Civil Defense, Emergencies and Elimination on Consequences of Natural Disasters, Borisa Galushkina St., 4, Moscow, 129366, Russian Federation; ID RISC: 772016; ORCID: 0000-0002-0436-4974; e-mail: dvoenko_oleg@mail.ru

Andrey S. GUMIROV, Postgraduate Student, 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

обороны, чрезвычайным ситуациям и ликвидации последствий стихийных бедствий, Россия, 129366, г. Москва, ул. Бориса Галушкина, 4; РИНЦ ID: 1052288; ORCID: 0000-0001-8550-5179; e-mail: romb55cool2014@yandex.ru

СОКОВНИН Артем Игоревич, канд. техн. наук, доцент кафедры организации деятельности пожарной охраны в составе Учебно-научного комплекса систем обеспечения пожарной безопасности, Академия Государственной противопожарной службы Министерства Российской Федерации по делам гражданской обороны, чрезвычайным ситуациям и ликвидации последствий стихийных бедствий, Россия, 129366, г. Москва, ул. Бориса Галушкина, 4; РИНЦ ID: 773348; ORCID: 0000-0002-4453-6355; e-mail: SokovninArtem88@yandex.ru

СЕРЕГИН Максим Вадимович, заместитель начальника службы — начальник дежурной смены, Служба пожаротушения Федеральной противопожарной службы Управления организации пожаротушения и проведения аварийно-спасательных работ, Россия, 119034, ул. Пречистенка, 22/2, стр. 1; ORCID: 0000-0002-3793-1736; e-mail: 89652883927@mail.ru

СЕМЕНИЮК Игорь Олегович, помощник начальника дежурной смены, Служба пожаротушения Федеральной противопожарной службы Управления организации пожаротушения и проведения аварийно-спасательных работ, Россия, г. Москва, 119034, ул. Пречистенка, 22/2, стр. 1; ORCID: 0000-0001-6890-2690; e-mail: 89652883927@mail.ru

ЦАРИЧЕНКО Сергей Георгиевич, д-р техн. наук, профессор кафедры комплексной безопасности в строительстве, Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет, Россия, 129337, г. Москва, Ярославское шоссе, 26; РИНЦ ID: 181475; ORCID: 0000-0002-9807-6841; e-mail: tsarichenko_s@mail.ru

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

ration; ID RISC: 1052288; ORCID: 0000-0001-8550-5179; e-mail: romb55cool2014@yandex.ru

Artem I. SOKOVNIN, Cand. Sci. (Eng.), Associate Professor of the Department of Organization of Fire Protection Activities as Part of Scientific Complex of Fire Safety Systems, the State Fire Academy of the Ministry of Russian Federation for Civil Defense, Emergencies and Elimination on Consequences of Natural Disasters, Borisa Galushkina St., 4, Moscow, 129366, Russian Federation; ID RISC: 773348; ORCID: 0000-0002-4453-6355; e-mail: SokovninArtem88@yandex.ru

Maxim V. SEREGIN, Deputy Head of the Service — Head of the Duty Shift, Fire Extinguishing Service of the Federal Fire Service of the Department of Organization of Fire Extinguishing and Emergency Rescue Operations, Prechistenka St., 22/2, bldg. 1, Moscow, 119034, Russian Federation; ORCID: 0000-0002-3793-1736; e-mail: 89652883927@mail.ru

Igor O. SEMENYUK, Assistant to the Head of the Duty Shift, Fire Extinguishing Service of the Federal Fire Service of the Department of Organization of Fire Extinguishing and Emergency Rescue Operations, Prechistenka St., 22/2, bldg. 1, Moscow, 119034, Russian Federation; ORCID: 0000-0001-6890-2690; e-mail: 89652883927@mail.ru

Sergey G. TSARICHENKO, Dr. Sci. (Eng.), Professor of Department of Integrated Safety in Civil Engineering, National Research Moscow State University of Civil Engineering, Yaroslavskoe Shosse, 26, Moscow, 129337, Russian Federation; ID RISC: 181475; ORCID: 0000-0002-9807-6841; e-mail: tsarichenko_s@mail.ru

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

Системы защиты ячеек и батарейных блоков с литий-ионными аккумуляторами. Часть 1

Александр Сергеевич Харламенков ✉

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

АННОТАЦИЯ

Представлены требования нормативных документов по реализации безопасной эксплуатации аккумуляторов и аккумуляторных батарей. Проведено обобщение современных способов обеспечения защиты литий-ионных аккумуляторов. Рассмотрены различные системы защиты единичных элементов питания для предупреждения и устранения аварийных режимов работы. Дано описание принципов работы защитных устройств и примеры их реализации на практике. Показан принцип электронной системы защиты в виде небольших печатных плат, встроенных в корпус аккумулятора.

Ключевые слова: тепловой разгон; короткое замыкание; горючие газы; взрыв; печатная плата; пожарная опасность

Для цитирования: Харламенков А.С. Системы защиты ячеек и батарейных блоков с литий-ионными аккумуляторами. Часть 1 // Пожаровзрывобезопасность/Fire and Explosion Safety. 2022. Т. 31. № 4. С. 76–79.

✉ Харламенков Александр Сергеевич, e-mail: h_a_s@live.ru

Systems for protecting cells and batteries with lithium-ion batteries. Part 1

Aleksandr S. Kharlamenkov ✉

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

ABSTRACT

The requirements of regulatory documents on the implementation of the safe operation of batteries and rechargeable batteries are presented. A generalization of modern methods for ensuring the protection of lithium-ion batteries was carried out. Various systems of protection of single batteries for the prevention and elimination of emergency modes of operation are considered. A description of the principles of operation of protective devices and examples of their implementation in practice is given. The principle of operation of the electronic protection system in the form of small printed circuit boards built into the battery case is shown.

Keywords: thermal acceleration; short circuit; combustible gases; printed circuit board; fire hazard

For citation: Kharlamenkov A.S. Systems for protecting cells and batteries with lithium-ion batteries. Part 1. *Pozharovzryvobezopasnost/Fire and Explosion Safety*. 2022; 31(4):76-79. (rus.).

✉ Aleksandr Sergeevich Kharlamenkov, e-mail: h_a_s@live.ru



ВОПРОС

В рубрике «Вопрос-ответ» журнала № 3 за 2022 г. [1] были представлены основные правила безопасности, снижающие вероятность возникновения пожара/взрыва при хранении и обслуживании литиевых аккумуляторов. Помимо указанных мер для обеспечения безопасной эксплуатации аккумуляторных батарей (далее АКБ) фирмы-производители используют различные инженерно-технические решения по предотвращению перехода АКБ в аварийное состояние с последующим воспламенением или взрывом.

В зависимости от варианта исполнения (одна батарея, пакет, батарейный блок) аккумуляторы снабжаются различными друг от друга системами защиты. Какие же технические способы и средства обеспечения безопасной эксплуатации литиевых АКБ применяются на сегодняшний день?

ОТВЕТ

В ГОСТ Р МЭК 62619–2020¹ указано, что неправильное использование аккумуляторов допускается. При этом они не должны представлять значительную опасность, а именно:

¹ ГОСТ Р МЭК 62619–2020. Аккумуляторы и аккумуляторные батареи, содержащие щелочной или другие неокислотные электролиты. Требования безопасности для литиевых аккумуляторов и батарей для промышленных применений : введен в действие 01.08.2020. М. : Стандартинформ, 2020.

- воспламенение;
- взрыв;
- критическое электрическое короткое замыкание из-за утечки из аккумулятора электролита;
- выброс, который непрерывно выпускает легко-воспламеняющиеся газы;
- разрыв корпуса аккумулятора с выходом его внутренних компонентов.

Конструкция АКБ не должна допускать аномального повышения температуры и обеспечивать функцию сброса давления, которая исключает разрыв корпуса или взрыв. Для исключения и предотвращения указанных аварийных состояний литий-ионных аккумуляторов применяют различные системы защиты.

Все способы защиты литиевых АКБ можно условно разделить на внутренние/внешние и электронные/неэлектронные (без использования печатных плат с микропроцессорами).

Внутренняя защита реализуется для единичного элемента и направлена на предотвращение его перегрева, саморазгона, вздутия и взрыва. Поддержание нормальной работы литий-ионного аккумулятора в процессе его зарядки/разрядки обеспечивает сепаратор — мембрана из пористого полипропилена, ограничивающая движение ионов от одного электрода к другому. В случае излишнего нагрева электролита батареи, мембрана способна практически полностью блокировать движение ионов, тем самым останавливая химическую реакцию и перегрев корпуса аккумулятора. В отдельных случаях при значительном нагреве электролита возможно плавление сепаратора и его пробой, что приводит к аварийному режиму работы литий-ионного аккумулятора с запуском реакции «саморазгона».

Защита аккумулятора от перегрева может быть реализована с помощью дополнительного полимерного слоя, наносимого между катодом и токосъемником [2]. Этот полимер способен изменять электропроводность в зависимости от напряжения, действуя как химический выключатель. При напряжении на ячейке более 4,2 В увеличивает сопротивление электрода более чем в 20 раз, а во время перезарядки при напряжении 5 В позволяет осуществить обратимый процесс заряда/разряда без развития побочных процессов.

Со стороны положительной клеммы наиболее распространенных цилиндрических аккумуляторов марки 18650 устанавливается система защиты (см. рис. 1). Она включает в себя: защиту от нагрева АКБ в результате короткого замыкания или больших зарядных токов (PTC); защиту от вздутия (разрыва) корпуса аккумулятора при повышении давления за счет перегрева электролита с переходом его в газообразное состояние (CID).

Аббревиатура «PTC» расшифровывается как «устройство с положительным температурным коэффициентом» — терморезистор в виде шайбы, увеличивающий свое

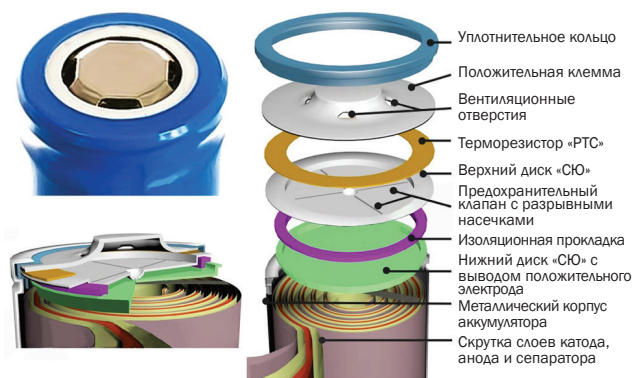


Рис. 1. Система защиты цилиндрических литий-ионных аккумуляторов

внутреннее сопротивление при повышении величины зарядного тока, протекающего через положительную клемму. Данная защита устанавливается в аккумуляторы далеко не всеми фирмами-производителями.

Устройство представляет собой несколько слоев из металлических токопроводящих колец (толщиной около 40 мкм) и полимерного заполнителя (толщиной около 240 мкм). Последний выполнен из полиэтилена, смешанного с проводящими частицами, который в нормальных условиях обладает низким сопротивлением (20–50 мОм). Чрезмерный ток приводит к излишнему нагреву полимерного слоя. При достижении температуры более 100 °С полиэтилен начинает расширяться и тем самым увеличивать расстояние между проводящими металлическими шайбами и частицами, что приводит к повышению сопротивления шайбы (более 150 Ом при температуре 104 °С) [3]. Этим способом ограничивается величина зарядного тока и чрезмерный нагрев аккумулятора.

PTC принято считать обратимым (самовосстанавливающимся) устройством, которое при уменьшении зарядного тока и снижения температуры клеммы восстанавливает свое исходное сопротивление. В случаях частых перегревов терморезистор PTC снижает свою проводимость почти в 2 раза без возможности восстановления, что ведет к невозможности дальнейшей эксплуатации аккумулятора.

Аббревиатура «CID» расшифровывается как «устройство прерывания тока» — подвижный контакт, отключающий подачу напряжения на положительную клемму в случае перегрева АКБ и воздействия на подвижную мембрану (предохранительный клапан) избыточного давления с выделением газа из корпуса аккумулятора. Клапан располагается на стороне положительного контакта аккумулятора. Перегрев аккумулятора с выделением газообразного электролита возможен при внутреннем или внешнем коротком замыкании, а также в результате превышения номинальной величины зарядного тока.

Устройство CID состоит из трех основных элементов (см. рис. 2). К ним относятся два диска (верхний и нижний), а также слой изолятора.

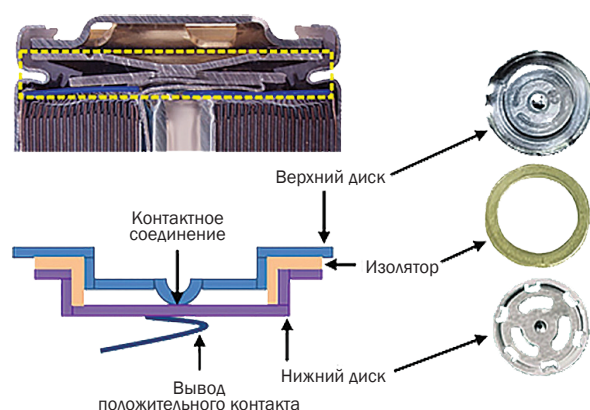


Рис. 2. Общий вид и схема устройства прерывания тока «CID»

Между дисками имеется точечное соединение, расположенное в центральной части (см. рис. 3, а). Именно через это соединение протекает зарядный ток. В случае перегрева аккумулятора часть электролита переходит в газообразное состояние. Газы воздействуют на верхний диск (клапан), который, поднимаясь вверх, разрывает точечное соединение с нижним диском (см. рис. 3, б). Так прерывается процесс зарядки аккумулятора.

Следует понимать, что после обесточивания аккумулятора процесс газообразования прекращается не сразу, так как электролит еще долго находится в нагретом состоянии. Поэтому возникает необходимость сброса избыточного давления для предотвращения вздутия и разрыва корпуса АКБ. Для этой цели в предохранительном клапане CID имеются специальные «С»- или «Х»-образные насечки, по которым происходит его разрыв с выбросом газообразного электролита в окружающую среду через вентиляционные отверстия положительной клеммы (см. рис. 3, с). Для разрыва верхнего диска CID в местах насечек по разным данным требуется давление, превышающее 2,2–2,5 МПа [3].

Устройство CID чаще всего является необратимым, так как при разрыве точечного контакта или предохранительного клапана в местах нанесения специальных насечек аккумулятор далее невозможно эксплуатировать (кроме отдельных случаев).

У некоторых моделей аккумуляторов имеется дополнительная защита со стороны отрицательной клеммы, представляющая собой предохранительный клапан, который



Рис. 3. Принцип действия устройства прерывания тока «CID»: а — нормальный режим работы; б — отключение питания положительной клеммы аккумулятора; с — выброс газообразного электролита через вентиляционные отверстия с разрывом насечек предохранительного клапана

вскрывается и осуществляет сброс накопленных газов при давлении более 2,5 МПа.

Для эффективного срабатывания устройства CID требуется постоянная разработка новых и совершенствование старых конструкций предохранительного клапана, а также вентиляционных каналов для отвода газа. Как показало исследование [4], отдельные конструкции аккумуляторов имеют значительные задержки по времени вскрытия клапана, что приводит к повреждению стенок корпуса АКБ. Применяемые в проектной практике программные продукты позволяют подобрать оптимальные размеры и форму вентиляционных отверстий и разрывных насечек системы защиты литий-ионных аккумуляторов, тем самым снижая вероятность возникновения аварийной ситуации.

Со стороны отрицательной клеммы аккумулятора может быть установлена электронная защита, которая представляет собой небольшую печатную плату (PCB или PCM), обеспечивая защиту АКБ от перегрузки, короткого замыкания, перезаряда и глубокого разряда. Часто данный элемент защиты называют контроллером, что не совсем корректно, так как данный модуль защиты не устанавливает зарядный ток, не контролирует температурные режимы работы и не отключает батарею при ее полной зарядке. Такие контроллеры применяются на практике, но располагаются не в АКБ, а в зарядном устройстве.

Вне зависимости от форм-фактора плата PCB включает в себя практически одинаковый набор элементов (см. рис. 4). Наиболее распространенная внутренняя электронная защита аккумулятора реализуется с применением интегральной микросхемы DW01 [5] и двух полевых транзисторов с изолированными затворами (MOSFET или МОП-транзисторы), выполняющих в схеме роль ключей. Один из них обеспечивает защиту от глубокого разряда (менее 2,5–2,7 В), второй — от перезаряда (выше 4,1–4,3 В). На рис. 4 оба МОП-транзистора расположены в одном корпусе с 8 выводами (8205A). Защита от перегрузки по току осуществляется за счет измерения падения напряжения на полевых транзисторах, где их переходное сопротивление выступает в роли измерительного шунта.

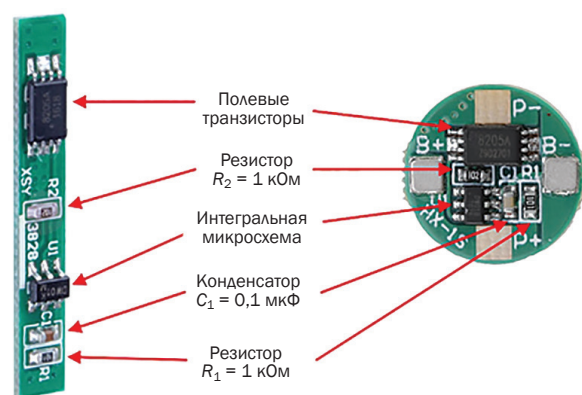


Рис. 4. Общий вид внутренней электронной защиты литий-ионных аккумуляторов

Таким образом, к основной внутренней системе защиты следует относить устройства *PTC* и *CID*, которые достаточно эффективно справляются с задачей предотвращения саморазгона аккумулятора, его вздутия, взрыва. Применение предохранительного клапана и электронной системы защиты в виде платы *PCB*, установленных со стороны отрицательной клеммы АКБ, следует считать дополнительной мерой, повышающей безопасность эксплуатации единичного аккумуляторного элемента. Оба устройства (*PTC* и *CID*), работая совместно, предупреждают развитие аварийных ситуации при повседневной эксплуатации АКБ.

В то же время отмечались случаи отказа представленных выше систем защиты по причине дефектов в конструкции устройств, загрязнения вентиляционных отверстий, некачественного нанесения насечек на предохранительный клапан и т.д. В целом устройства *PTC* и *CID* считаются эффективными для защиты единичного аккумуляторного элемента, но не всегда срабатывают в составе аккумуляторных сборок с *n*-м количеством аккумуляторов (пакеты, блоки), где требуются иные — внешние системы защиты, которые будут рассмотрены в следующем номере журнала.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Харламенков А.С. Пожарная опасность применения литий-ионных аккумуляторов в России // Пожаровзрывобезопасность/Fire and Explosion Safety. 2022. Т. 31. № 3. С. 96–102.
2. Beletskii E.V., Kal'nin A.Y., Luk'yanov D.A., Kamenskii M.A., Anishchenko D.V., Levin O.V. A polymer layer of switchable resistance for the overcharge protection of lithium-ion batteries // Russian Journal of Electrochemistry. 2021. Vol. 57. Issue 10. Pp. 1028–1036. DOI: 10.1134/S1023193521100050
3. Xu B., Kong L., Wen G., Pecht M.G. Protection devices in commercial 18650 lithium-ion batteries // IEEE Access. 2021. Vol. 9. Pp. 66687–66695. DOI: 10.1109/ACCESS.2021.3075972
4. Chen Y., Kang Y., Zhao Y., Wang L., Liu J., Li Y. et al. A review of lithium-ion battery safety concerns: The issues, strategies, and testing standards // Journal of Energy Chemistry. 2021. Vol. 59. Pp. 83–99. DOI: 10.1016/j.jchem.2020.10.017
5. Бурцев А.П., Кочергин О.Б. Повышение надежности схемы от короткого замыкания и перегрузки аккумуляторных банок типа LI-ION // Будущее науки — 2021 : сб. науч. ст. 9-й Междунар. молодежной науч. конф. : в 6- т. Курск, 2021. Т. 3. С. 222–225.

Материал поступил в редакцию 01.08.2022

Received August 1, 2022

Информация об авторе

ХАРЛАМЕНКОВ Александр Сергеевич, заместитель начальника кафедры специальной электротехники, автоматизированных систем и связи, Академия Государственной противопожарной службы Министерства Российской Федерации по делам гражданской обороны, чрезвычайным ситуациям и ликвидации последствий стихийных бедствий, Россия, 129366, г. Москва, ул. Бориса Галушкина, 4; РИНЦ ID: 763967; e-mail: h_a_s@live.ru

Information about the author

Aleksandr S. KHARLAMENKOV, Deputy Head of Department of Special Electrical Engineering, Automation Systems and Communication, the State Fire Academy of the Ministry of Russian Federation for Civil Defense, Emergencies and Elimination on Consequences of Natural Disasters, Borisa Galushkina St., 4, Moscow, 129366, Russian Federation; ID RISC: 763967; e-mail: h_a_s@live.ru

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 общепотребительных, следует применять в исключительных случаях или давать их расшифровку и определение при первом упоминании в тексте резюме.

В авторское резюме не следует включать схемы, таблицы, иллюстрации, формулы, а также ссылки на публикации, приведенные в списке литературы к статье.

Для повышения эффективности при онлайн-поиске включите в текст аннотации ключевые слова и термины из основного текста и заглавия статьи.

2.5. Ключевые слова на русском и английском языках (не менее 5 слов или коротких словосочетаний). Они указываются через точку с запятой. Недопустимо в качестве ключевых слов использовать термины общего характера (например, проблема, решение и т.п.), не являющиеся специфической характеристикой публикации. Используемые в заголовке слова и термины не нужно повторять в качестве ключевых слов: ключевые слова должны дополнять информацию в заголовке. При переводе ключевых слов на английский язык избегайте по возможности употребления слов «and» (и), «of» (предлог, указывающий на принадлежность), артиклей «a», «the» и т.п.

2.6. Основной текст статьи должен быть набран через 1,5 интервала в формате Word. Формулы должны быть набраны в Microsoft Equation или MathType.

Цитируемый текст из других публикаций следует брать в кавычки. Таблицы, рисунки, методы, численные данные (за исключением общеизвестных величин), опубликованные ранее, должны сопровождаться ссылками.

Если представленные в статье исследования выполнены авторами при финансовой поддержке Российского фонда фундаментальных исследований, Российского научного фонда, Министерства образования и науки Российской Федерации и т.п., то в конце статьи обязательно следует дать информацию об этом с указанием номера и названия гранта (научного проекта, госконтракта и т.д.).

Сокращения и условные обозначения физических величин в тексте статьи должны соответствовать действующим международным стандартам. Формулы и буквенные обозначения должны быть четкими и ясными. Все буквенные обозначения, входящие в формулы, должны быть расшифрованы с указанием единиц измерения. Размерность всех характеристик должна соответствовать системе СИ. Иллюстрации в электронной версии прилагаются отдельно. Фотографии должны быть сделаны с хорошего негатива контрастностью (файлы растровых изображений предоставляются с разрешением не менее 300 dpi, черно-белая штриховая графика — 600 dpi). Файлы векторной графики следует предоставлять в формате той программы, в которой они созданы, либо печатать PDF-файл из этой программы. Все иллюстрации должны иметь сквозную нумерацию. Чертежи и карты в качестве иллюстраций неприемлемы. Ссылки на все рисунки в тексте обязательны.

Таблицы должны быть составлены лаконично и содержать только необходимые сведения; однотипные таблицы следует строить одинаково. Цифровые данные необходимо округлять в соответствии с точностью эксперимента. Сведения в таблицах и на рисунках не должны повторяться. Ссылки на все таблицы в тексте обязательны.

В журнале предусматривается двуязычное представление табличного и графического материала, поэтому необходимо прислать перевод на английский язык:

- для таблицы: ее названия, шапки, боковика, текста во всех строках, сносок и примечаний;
- для рисунка: подписочной подписи и всех текстовых надписей на самом рисунке;
- для схемы: подписи к ней и всего содержания самой схемы.

2.7. Пристайные списки литературы на русском языке и языке оригинала (если книга переводная).

Список литературы должен включать библиографические сведения обо всех публикациях, упоминаемых в статье, и не должен содержать указаний на работы, на которые в тексте нет ссылок. Литература должна быть оформлена в виде общего списка в порядке упоминания. В тексте ссылка на литературу отмечается порядковой цифрой в квадратных скобках, например [1]. Библиографические данные приводятся по титульному листу издания. Порядок изложения элементов библиографического описания определяется требованиями ГОСТ 7.1-2003 и ГОСТ Р 7.0.5-2008.

В описании источников необходимо указывать всех авторов.

Наряду с этим для научных статей список литературы должен отвечать следующим требованиям.

Список литературы должен содержать не менее 20 источников (в это число не входят нормативные документы, патенты, ссылки на сайты компаний и т.п.). При этом количество ссылок на статьи из иностранных научных журналов и другие иностранные источники должно быть не менее 40 % от общего количества ссылок. Не более половины от оставшихся 60 % должны составлять статьи из русскоязычных научных журналов, остальное — другие первоисточники на русском языке.

Не менее половины источников должно быть включено в один из ведущих индексов цитирования: Российский индекс научного цитирования eLibrary, Web of Science, Scopus, Chemical Abstracts, MathSciNet, Springer и др. В случае присвоения публикациям цифрового идентификатора объекта (DOI) его необходимо указать, что позволит однозначно идентифицировать объект в базах данных.

Состав источников должен быть актуальным и содержать не менее половины современных (не старше 10 лет) статей из научных журналов или других публикаций.

В списке литературы должно быть не более 30 % источников, автором либо соавтором которых является автор статьи.

Следует обратить внимание на публикации диссертаций (особенно докторских), защищенных в последние годы по ближайшей научной специальности или группе специальностей. Для поиска рекомендуется использовать ресурс <http://www.dissercat.com>.

Не следует включать в список литературы ГОСТы; ссылки на них должны быть даны непосредственно по тексту статьи.

Убедитесь, что указанная в списке литературы информация (Ф.И.О. автора, название книги или журнала, год издания, том, номер и количество (интервал) страниц) верна.

Неопубликованные результаты, проекты документов, личные сообщения и т.п. не следует указывать в списке литературы, но они могут быть упомянуты в тексте.

2.8. References (пристайные списки литературы на английском языке). Представление в References только транслитерированного (без перевода) описания недопустимо. Обращаем Ваше внимание, что перевод названия статей следует давать так, как он проходил при их публикации, а перевод названий журналов должен быть официально принятым. Произвольное сокращение названий источников цитирования приведет к невозможности идентифицировать ссылку в электронных базах данных.

При составлении References необходимо следовать схеме:

- ИОФ авторов (транслитерация; для ее написания используйте сайт <http://fotosav.ru/services/transliteration.aspx>, обязательно включив в настройках справа 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!