

1-2020

FIRE and EXPLOSION
SAFETY

ПОЖАРОВЗРЫВО-

БЕЗОПАСНОСТЬ



НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКИЙ ЖУРНАЛ

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

КОМПЛЕКСНАЯ БЕЗОПАСНОСТЬ

пожарная • промышленная • производственная • экологическая

КАКОВА
"СТОИМОСТЬ"
ПОЖАРОВ
В СОВРЕМЕННОМ
МИРЕ?



26-я Международная выставка
технических средств охраны
и оборудования для обеспечения
безопасности и противопожарной защиты



a Hyve event



Москва, Крокус Экспо

13–16
апреля
2020



Видеонаблюдение



Контроль
доступа



Охрана
периметра



Противопожарная
защита



Сигнализация
и оповещение



Автоматизация
зданий

РЕКЛАМА



securika-moscow.ru

Бесплатный билет
по промо-коду:

sec20p0



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

Адрес:

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

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

СМИ зарегистрировано Федеральной
службой по надзору в сфере связи,
информационных технологий и массо-
вых коммуникаций — свидетельство ПИ
№ ФС 77-43615 от 18 января 2011 г.

Префикс DOI: 10.18322.

РЕДАКЦИЯ:

Зав. редакцией **Корольченко О. Н.**

Шеф-редактор **Соколова Н. Н.**

Редактор **Крылова Л. В.**

Адрес редакции:

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

Адрес для переписки:

121352, Россия, г. Москва, а/я 26.

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

E-mail: info@fire-smi.ru

https://www.fire-smi.ru

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

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

Подписано в печать 14.02.2020.

Выход в свет 25.02.2020.

Формат 60x84 1/8. Тираж 2000 экз.

Бумага мелованная матовая.

Печать офсетная. Цена свободная.

Распространяется по подписке.

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

ГЛАВНЫЙ РЕДАКТОР:

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

ЗАМ. ГЛАВНОГО РЕДАКТОРА:

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

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

РЕДАКЦИОННАЯ КОЛЛЕГИЯ:

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

СОДЕРЖАНИЕ

НОВОСТИ, КОНФЕРЕНЦИИ, ВЫСТАВКИ

I Международная научно-практическая конференция
“Огнезащита материалов и конструкций”, Россия,
г. Санкт-Петербург, 20–24 апреля 2020 г.

5

ПРОЦЕССЫ ГОРЕНИЯ, ДЕТОНАЦИИ И ВЗРЫВА

Ю. Х. ПОЛАНДОВ, Д. А. КОРОЛЬЧЕНКО, А. А. ЕВИЧ
Условия возникновения пожара в помещении
при газовом взрыве. Экспериментальные данные

9

С. В. ПУЗАЧ, В. М. МУСТАФИН, Р. Г. АКПЕРОВ
Влияние условий проведения испытаний в камере
сгорания мелкомасштабной экспериментальной
установки на дымообразующую
способность древесины

23

БЕЗОПАСНОСТЬ ВЕЩЕСТВ И МАТЕРИАЛОВ

А. Ю. ШЕБЕКО, Н. И. КОНСТАНТИНОВА,
С. Г. ЦАРИЧЕНКО
Пожарная опасность текстильных материалов
на основе полиэфирных волокон для вагонов
железнодорожного транспорта

32

Е. Ю. КРУГЛОВ, Р. М. АСЕЕВА
Беспламенное горение древесины:
параметры макрокинетики пиролиза
и термоокислительного разложения

43

А. В. ИВАНОВ, С. О. СТОЛЯРОВ,
Ф. А. ДЕМЕНТЬЕВ, А. П. ФЕРУЛЕВ
Исследование эксплуатационных характеристик
огнезащитных покрытий на основе эпоксидных смол,
модифицированных астраленами

55

БЕЗОПАСНОСТЬ ЖИЗНЕДЕЯТЕЛЬНОСТИ

В. Д. ТИМОФЕЕВ
Актуальность исследований уровня
осведомленности студентов, проживающих
в общежитии, о пожарной безопасности

69

СТАТИСТИКА И СИСТЕМНЫЙ АНАЛИЗ

Н. Н. БРУШЛИНСКИЙ, С. В. СОКОЛОВ
Какова “стоимость” пожаров в современном мире?

79

ВОПРОС – ОТВЕТ

А. С. ХАРЛАМЕНКОВ
Современная молниезащита зданий
и сооружений. Часть 2

89

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

CONTENTS

NEWS, CONFERENCES, EXHIBITIONS

I International Scientific-Practical Conference
“Fire Protection of Materials and Structures”,
Russia, Saint Petersburg, 20–24 April, 2020

5

COMBUSTION, DETONATION AND EXPLOSION PROCESSES

Yu. Kh. POLANDOV, D. A. KOROLCHENKO, A. A. EVICH
Conditions of occurrence of fire in the room
with a gas explosion. Experimental data

9

S. V. PUZACH, V. M. MUSTAFIN, R. G. AKPEROV
Influence of conditions in the combustion
chamber of small-scale installation
on smoke generating ability
of wood

23

SAFETY OF SUBSTANCES AND MATERIALS

A. Yu. SHEBEKO, N. I. KONSTANTINOVA,
S. G. TSARICHENKO
Fire hazard of textile materials
based on polyester fibers
for rail vehicles

32

E. Yu. KRUGLOV, R. M. ASEEVA
Flameless burning of wood: parameters
of macrokinetics of pyrolysis and thermo-oxidative
decomposition

43

A. V. IVANOV, S. O. STOLYAROV,
F. A. DEMENTYEV, A. P. FERULEV
Study of the operational characteristics
of fireproof coatings based on epoxy resins
modified with astralenes

55

LIFE SAFETY

V. D. TIMOFEEV
Relevance of studies of the level of awareness
of students on fire safety living
in dormitories

69

STATISTICS AND SYSTEM ANALYSIS

N. N. BRUSHLINSKIY, S. V. SOKOLOV
How much is the fire “cost” in the modern world?

79

QUESTION – ANSWER

A. S. KHARLAMENKOV
Modern lightning protection of buildings and
constructions. Part 2

89

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.



Условия возникновения пожара в помещении при газовом взрыве

Стр. 9



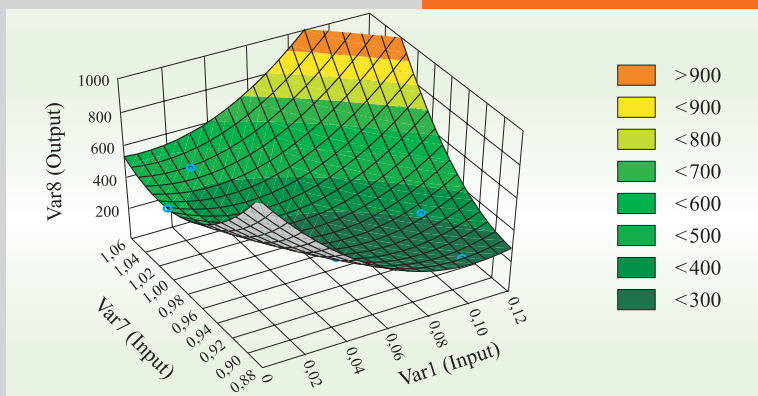
Пожарная опасность текстильных материалов для вагонов

Стр. 32



Макрокинетические параметры беспламенного горения древесины

Стр. 43



Стр. 55

Огнезащитные покрытия на основе эпоксидных смол с астраленами

Стр. 79



Какова "стоимость" пожаров в современном мире?

КОМПЛЕКСНАЯ БЕЗОПАСНОСТЬ

пожарная • промышленная • производственная • экологическая



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

Address:

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

Journal founded in 1992,
issued 6 times per year.

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

EDITORIAL STAFF:

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

Editorial Director **N. N. Sokolova**

Editor **L. V. Krylova**

Address of Editorial Staff:

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

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

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

E-mail: info@fire-smi

https://www.fire-smi.ru

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

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

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

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

Signed for printing 14.02.2020.

Date of publication 25.02.2020.

Format is 60x84 1/8.

Printing is 2000 copies.

Chalk-overlay mat paper.

Offset printing. Free price.

Journal sells subscription.

Printed at “Gran Pri”, Ltd.

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

EDITOR-IN-CHIEF:

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

DEPUTY EDITOR-IN-CHIEF:

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

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

EDITORIAL BOARD:

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

Yu. Kh. Polandov, Dr. Sci. (Eng.), Professor (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 Manage-
ment, Budapest, Hungary)

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

Второй циркуляр

Российская академия наук

Министерство Российской Федерации по делам гражданской обороны, чрезвычайным ситуациям и ликвидации последствий стихийных бедствий

Институт химической физики
им. Н. Н. Семенова РАН

Институт биохимической физики
им. Н. М. Эмануэля РАН

Санкт-Петербургский политехнический
университет Петра Великого

Академия Государственной противопожарной служ-
бы МЧС России

Всероссийский научно-исследовательский
институт противопожарной обороны МЧС России

Уральский институт Государственной
противопожарной службы МЧС России

Научно-исследовательский институт пожарной
безопасности и проблем чрезвычайных ситуаций
МЧС Республики Беларусь

Кокшетауский технический институт КЧС МВД
Республики Казахстан

Научно-исследовательский институт
проблем горения Республики Казахстан

Ассоциация пожарной, промышленной
и экологической безопасности



I Международная
научно-практическая конференция

ОГНЕЗАЩИТА МАТЕРИАЛОВ И КОНСТРУКЦИЙ

Место проведения
конференции:

Санкт-Петербургский
политехнический универ-
ситет Петра Великого.

Адрес: 195251, г. Санкт-
Петербург, ул. Политех-
ническая, д. 29

Официальный сайт конференции:
<http://fpm.spbstu.ru>

Дата проведения: 20–24 апреля 2020 г.

ОРГАНИЗАЦИОННЫЙ КОМИТЕТ КОНФЕРЕНЦИИ:

Председатель:

Берлин А. А. Академик РАН, научный руко-
водитель ИХФ РАН

Сопредседатель:

Рудской А. И. Академик РАН, ректор Санкт-
Петербургского политехниче-
ского университета Петра
Великого

Заместители председателя:

Сивенков А. Б. Профессор, Академия
ГПС МЧС России, д. т. н.,
профессор

Танклевский Л. Т. Заведующий кафедрой пожар-
ной безопасности Санкт-
Петербургского политехниче-
ского университета Петра
Великого, д. т. н., профессор

ЧЛЕНЫ ОРГАНИЗАЦИОННОГО КОМИТЕТА:

Абдикаримов М. Н. Профессор, Алматинский уни-
верситет энергетики и связи
им. Гумарбека Даукеева (АУЭС),
Республика Казахстан

Акулов А. Ю. Начальник адъюнктуры
Уральского института ГПС
МЧС России, к. т. н., доцент

Алешков М. В. Заместитель начальника
Академии ГПС МЧС России
по научной работе, д. т. н.,
профессор

Асеева Р. М. Профессор, Академия ГПС
МЧС России, д. х. н.,
профессор

Богданова В. В. Профессор, НИИ ФХП БГУ,
Республика Беларусь, д. х. н.,
профессор

Бабкин О. Э. Профессор Санкт-Петербург-
ского университета кино и те-
левидения, д. т. н., профессор

Варфоломеев С. Д. Научный руководитель ИБХФ
РАН, чл.-корр. РАН

Гаращенко А. Н. ЦНИИСМ (г. Хотьково),
д. т. н., доцент

Голованов В. И. Главный научный сотрудник,
ВНИИПО МЧС России,
д. т. н., доцент

Гордиенко Д. М. Начальник ВНИИПО МЧС
России, д. т. н.

Гравит М. В. Санкт-Петербургский политех-
нический университет Петра
Великого, к. т. н., доцент

Захматов В. Д. Главный научный сотрудник
Института телекоммуникаций
глобального информационного
пространства НАН Украины,
д. т. н., профессор

Зубкова Н. С. Заместитель генерального ди-
ректора, ЗАО ФПД “Энерго-
контакт”, д. т. н., профессор

Ивахнюк Г. К.	Профессор Санкт-Петербургского государственного технологического института (технического университета), д. т. н., профессор	Suprun W.	Head of Laboratory of Heterogeneous Catalysis; Appl. Prof., Dr. of Science (habil.) (Physical Chemistry) Institute of Chemical Technology, University of Leipzig
Казиев М. М.	Профессор, Академия ГПС МЧС России, к. т. н., доцент	Шелоумов А. В.	Профессор, Санкт-Петербургская ЛТА, д. т. н., профессор
Карпов Д. А.	Заместитель начальника управления по связям с общественностью, Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого	Шумай С. М.	Начальник НИИ ПБ и ЧС МЧС Республики Беларусь
Коробейничев О. П.	Институт химической кинетики и горения им. В. В. Воеводского СО РАН, главный научный сотрудник лаборатории кинетики процессов горения, д. ф.-м. н., профессор	Шутов Ф. А.	Профессор, РХТУ им. Д. И. Менделеева, д. т. н., профессор
Ксандопуло Г. И.	Почетный директор Института проблем горения, академик РАТН, д. х. н., профессор	Ну Y.	State Key Lab of Fire Science University of Science and Technology of China, Professor
Константинова Н. И.	Профессор, ВНИИПО МЧС России, д. т. н., профессор	ПРОГРАММНЫЙ КОМИТЕТ:	
Леонович А. А.	Профессор, Санкт-Петербургская ЛТА, д. т. н., профессор	Председатель:	
Мансуров З. А.	Генеральный директор Института проблем горения, академик МАН ВШ, д. х. н., профессор	Зыбина О. А.	Заместитель директора по научной деятельности Высшей школы техносферной безопасности, Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого, д. т. н., доцент
Мнацаканов С. С.	Научный директор ООО "НПО "Иннотех", д. т. н., профессор	Члены программного комитета:	
Molkov V.	Director of Hydrogen Safety Engineering and Research Centre, Ulster University, UK	Альменбаев М. М.	Начальник факультета КТИ КЧС Республики Казахстан, к. т. н.
Новаков И. А.	Академик РАН, Президент Волгоградского ГТУ	Анохин Е. А.	Академия ГПС МЧС России, к. т. н.
Петров В. В.	Профессор, ЮФУ, д. т. н., профессор	Лукьянов А. С.	НИИ ПБ и ЧС МЧС Республики Беларусь, к. т. н.
Покровская Е. Н.	Профессор, МГСУ, д. т. н., профессор	Макишев Ж. К.	КТИ КЧС Республики Казахстан, к. т. н.
Раимбеков К. Ж.	Заместитель начальника КТИ КЧС МВД Республики Казахстан, к. ф.-м. н.	Сахаров П. А.	Институт биохимической физики РАН
Рева О. В.	Доцент кафедры ПГВ УГЗ Республики Беларусь, к. х. н., доцент	Халепа П. В.	Академия ГПС МЧС России
Ройтман В. М.	Профессор, Академия ГПС МЧС России, д. т. н., профессор	Андреев А. В.	Директор Высшей школы техносферной безопасности, Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого, к. в. н., доцент
Serdjuks D. O.	Department of Structural Engineering, Institute of Structural Engineering and Reconstruction, Riga Technical University, Latvia, Professor, Dr. Sci. (Eng.)	Ученые секретари:	
Серков Б. Б.	Профессор, Академия ГПС МЧС России, д. т. н., профессор	Кобелев А. А.	Академия ГПС МЧС России, к. т. н.
Снегирев А. Ю.	Профессор кафедры гидроаэродинамики, горения и теплообмена, Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого, д. т. н., профессор	Устинов А. А.	Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого, аспирант
		Технические секретари:	
		Матвеева Н. П.	Академия ГПС МЧС России
		Гомазов Ф. А.	Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого, аспирант

Основные направления научной конференции:

- Разработка огнезащитных средств для материалов и конструкций, исследование их эффективности и механизма огнезащитного действия
- Эффективные технологии применения средств огнезащиты для защиты материалов и конструкций для объектов различных сфер жизнедеятельности
- Методы огневых испытаний и экспериментальная оценка параметров эффективности огнезащиты
- Расчетно-программные комплексы и инженерные подходы к оценке технических параметров для средств огнезащиты
- Вопросы оценки и обеспечения долговечности средств огнезащиты, методы и подходы
- Нормативно-техническое обеспечение применения средств огнезащиты для материалов и конструкций
- Сертификация и подтверждение соответствия качества огнезащитных средств, их идентификация

Программа конференции включает серию лекций, докладов, дискуссий и стендовых сессий, выставку, подведение итогов, заявленных оргкомитетом конкурса на лучшую работу молодых ученых.

В программу конференции будут включены пленарные, устные и стендовые доклады.

Ключевые даты

- | | |
|----------------------|---|
| 15 декабря 2019 г. | Рассылка первого циркуляра. |
| 25 декабря 2019 г. | Начало регистрации участников на сайте Санкт-Петербургского политехнического университета Петра Великого. |
| 20 февраля 2020 г. | Рассылка второго циркуляра. |
| 15 марта 2020 г. | Окончание регистрации участников на сайте Санкт-Петербургского политехнического университета Петра Великого. |
| 15 марта 2020 г. | Окончание приема тезисов докладов и копии платежного поручения и регистрации на мероприятия культурной программы. |
| 20–24 апреля 2020 г. | Работа конференции. |

Правила оформления тезисов конференции

- Материалы представляются по электронной почте.
- Текст должен быть набран в редакторе Word for Windows (версия 6.0, русская редакция) шрифтом “Times New Roman Cyr” размером 14 пт, с межстрочным интервалом 1,5.
- Поля страницы: слева — 2,5 см, справа — 1,5 см, сверху и снизу — по 2 см.

- Формулы набираются в MS Equation 2.0.
- Рисунки и схемы в тексте должны быть сгруппированы.
- Объем тезисов не должен превышать трех страниц.

Порядок печати

Название статьи набирается по центру без переноса, жирным шрифтом, строчными буквами, через интервал — инициалы и фамилия автора строчными буквами, *например: А. А. Петров*; через интервал — полное название учебного заведения (организации), далее через интервал текст, в конце статьи — список литературы (не более 2–3 наименований).

За содержание докладов ответственность несут авторы. Программный комитет имеет право отклонить доклад. Все материалы публикуются в авторской редакции.

Тезисы докладов конференции будут распространены среди участников и гостей в начале мероприятия. Тезисы докладов, оформленные согласно правилам, направлять по адресу fpm@spbstu.ru с названием файла “Доклад_ИвановДА”.

Лучшие доклады Организационным комитетом будут рекомендованы к печати в сборнике статей конференции с индексацией в международной базе цитирования Scopus. Оплата стоимости публикации в сборнике статей будет осуществляться дополнительно согласно договору между издательством и авторами.

Справки по телефонам:

В Москве:

Кобелев Артем Александрович
+7 (926) 595-13-21; fpm@spbstu.ru

В Санкт-Петербурге:

Устинов Андрей Александрович
+7 (981) 799 78 98; fpm@spbstu.ru

Предварительная программа конференции

- 20 апреля** — заезд участников.
- 21 апреля** — регистрация, официальное открытие конференции, пленарное заседание, выставка, работа секций, экскурсия по университету, товарищеский ужин.
- 22 апреля** — продолжение работы секций, стендовые доклады, экскурсия по г. Санкт-Петербургу с посещением Эрмитажа.
- 23 апреля** — продолжение работы секций, круглый стол по вопросам и проблемам нормативно-технического применения средств огнезащиты с приглашением ведущих экспертов. Экскурсионная программа с посещением г. Кронштадта — г. Пушкина.
- 24 апреля** — подведение итогов, заявленных оргкомитетом конкурса за лучший доклад молодых ученых и специалистов, награждение дипломами и сертификатами, официальное закрытие конференции в Белом зале СПбПУ. Культурная программа — концерт. Отъезд.

ВЫСТАВКА-конференция
систем видеонаблюдения
и пожарно-охранной сигнализации

Security Ural

**21 — 23 апреля
2020**

Екатеринбург
МВЦ «Екатеринбург-ЭКСПО»

**ПОЛУЧИТЕ
БЕСПЛАТНЫЙ
БИЛЕТ**
на сайте
security-ural.ru

ВАШ ПРОМОКОД
SU20PN



12+

РЕКЛАМА

Организатор



Международная
Выставочная
Компания

Офис в Екатеринбурге
+7 (343) 226-04-29
security-ural@mvk.ru

security-ural.ru

Условия возникновения пожара в помещении при газовом взрыве. Экспериментальные данные

© Ю. Х. Поландов[✉], Д. А. Корольченко, А. А. Евич

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

РЕЗЮМЕ

Введение. Пожары, которые происходят при газовых взрывах в бытовых помещениях, усугубляют и без того опасную ситуацию, но они возникают не всегда. Это позволяет надеяться на возможность снижения пожарных рисков при газовых взрывах за счет проведения исследований и разработки соответствующих мер.

Задача исследования определена как изучение условий, при которых возникают пожары в случае газовых взрывов в помещении. Процесс взаимодействия газов и горючих материалов характеризуется кратковременностью взрыва и нагревом горючих материалов при дефиците кислорода. Предположительно, условиями возгорания горючих материалов являются их малая теплоемкость, место положения в объеме помещения и поступление туда наружного воздуха.

Методы и средства исследования. Экспериментальные исследования проводились в кубической камере объемом 10 м³, заполненной пропан-воздушной смесью. Осуществлялась регистрация давления взрыва и видеозапись вне и внутри камеры. Для оценки уровня воздействия пламени на горючий материал использовались специально разработанные индикаторы тепловых импульсов с чувствительным элементом из бумаги. Внутри камеры было установлено 35 индикаторов.

Результаты исследования и их обсуждение. Исследованиями установлено, что наименее пожароопасными местами, где тепловой импульс составлял менее 500 кДж/м², оказались углы камеры и ее пристенные области (за исключением верхней стенки), а наиболее пожароопасным — объем от центра вверх и до оконного проема по всей его ширине, где тепловой импульс составлял 600 кДж/м² и более. В местах склейки бумаги и проволоки коксование было заметно меньше, чем на остальной ее части. Бумага, находившаяся в пожароопасной зоне, воспламенялась при поступлении наружного воздуха после взрыва.

Выводы. Предположения об условиях возникновения пожара при газовом взрыве в помещении подтвердились: опасность возникновения пожара зависит от теплоемкости горючих материалов, места их положения в объеме и поступления наружного воздуха в камеру после взрыва.

Ключевые слова: статистика; эксперимент; индикаторы тепловых импульсов; горючие материалы; воспламенение.

Для цитирования: Поландов Ю. Х., Корольченко Д. А., Евич А. А. Условия возникновения пожара в помещении при газовом взрыве. Экспериментальные данные // Пожаровзрывобезопасность/Fire and Explosion Safety. — 2020. — Т. 29, № 1. — С. 9–21. DOI: 10.18322/PVB.2020.29.01.9-21.

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

Conditions of occurrence of fire in the room with a gas explosion. Experimental data

© Yuriy Kh. Polandov[✉], Dmitry A. Korolchenko, Andrey A. Evich

National Research Moscow State University of Civil Engineering
(Yaroslavl'skoye Shosse, 26, Moscow, 129337, Russian Federation)

ABSTRACT

Introduction. Fires that occur when gas explosions occur in residential areas exacerbate an already dangerous situation, but they do not always happen. This allows us to hope for the possibility of reducing fire risks in gas explosions by conducting research and developing measures for this.

The task of the research is defined as the study of the conditions under which fires occur in the case of gas explosions in the room. The process of interaction of gases and combustible materials is characterized by short-term explosion and heating of combustible materials with a lack of oxygen. Presumably, the conditions for the ignition of combustible materials are their low heat capacity, the location of the position in the volume and the flow of external air into the chamber.

Methods and means of research. The research was carried out experimentally on a 10 m³ cubic chamber filled with propane-air mixture. The explosion pressure was recorded and video was recorded outside and inside the chamber. To assess the level of flame impact on the combustible material, the developed indicators of heat flows with a sensitive element in the form of paper were used. There were 24 indicators inside the chamber.

Research result and discussion. It was found that less fire-dangerous places, where the thermal impulse was no more than 500 kJ/m², were the corners of the chamber and its wall areas, excluding the upper wall, and more fire-dangerous was the volume from the center up to the window opening along its entire width, where the thermal impulse was 600 kJ/m² or more. There were no visible traces of coking in the places where the paper and wire were glued together. The paper, which was in a fire-hazardous area, ignited when the outside air came in after the explosion.

Assumptions about the conditions of fire in a gas explosion in the room were confirmed: the risk of fire depends on the heat capacity of the combustible materials, their position in the volume and the flow of external air into the chamber after the explosion.

Keywords: statistics; experiment; heat flow indicators; combustible materials; ignition.

For citation: Yu. Kh. Polandov, D. A. Korolchenko, A. A. Evich. Conditions of occurrence of fire in the room with a gas explosion. Experimental data. *Pozharovzryvobezopasnost/Fire and Explosion Safety*, 2020, vol. 29, no. 1, pp. 9–21 (in Russian). DOI: 10.18322/PVB.2020.29.01.9-21.

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

Введение

Постановка задачи. Большинство газовых взрывов происходит в бытовых помещениях жилых зданий (табл. 1) [1–9]. Развиваемая при этом температура газов, как правило, значительно выше той, при воздействии которой воспламеняются горючие материалы (ГМ). Вероятно, в силу этого с молчаливого согласия научного и практикующего сообщества у нас и за рубежом принято считать, что газовый взрыв непременно должен привести к возникновению пожара внутри помещения. Мы пишем “с согласия” потому, что нам неизвестны нормативные документы и публикации, в которых эта неизбежность подвергалась бы сомнению [10–13]. С целью провести анализ корреляции между газовыми взрывами и последующими за ними пожарами мы обратились к статистическим данным МЧС России. К сожалению, в них не оказалось информации о пожарах, возникающих при взрывах, поэтому эти сведения пришлось брать из СМИ [14]. Согласно им пожары возникают далеко не во всех газовых взрывах. Впрочем, это объективно видно и из фотоматериалов о происходивших взрывах (рис. 1 и 2).

В связи с этим резонно поставить вопрос, а, собственно, чем отличаются условия, при которых в одних

случаях пожар возникает, а в других — нет? Вопрос этот отнюдь не праздный. И вот почему. Разрушительная сила газового взрыва, безусловно, представляет собой очень опасный фактор, но взрыв, дополненный последующим пожаром, делает ситуацию еще опаснее. Понятно, что исключение пожара при газовом взрыве снизило бы уровень рисков. Между тем такая задача до сих пор ни у нас, ни за рубежом не ставилась и потому не решалась.

Гипотеза об особенностях газовых взрывов в бытовых помещениях. Исследования в рамках постав-



Рис. 1. Взрыв газа с пожаром в жилом доме в Волгограде (2015 г.)

Fig. 1. Gas explosion with the fire in a residential building in Volgograd (2015)



Рис. 2. Взрыв газа без пожара в Ростовской области (2019 г.)

Fig. 2. Gas explosion without the fire in Rostov region (2019)

Таблица 1. Сведения о газовых взрывах в России

Table 1. Information about gas explosions in Russia

Год Year	Количество взрывов по данным МЧС Number of explosions according to the Ministry of Emergency Situations		
	на объектах жилого и бытового назначения on residential and household objects	на других объектах on other premises	с последующим возгоранием with subsequent fire
2012	10	6	8
2013	6	2	2
2014	10	7	4
2015	8	4	4
2016	11	4	3
2017	18	0	5

ленной задачи открывают практически новое научное направление, формирующееся на стыке наук о процессах пожара и газового взрыва. Новизна заключается в особенностях условий, при которых развивается процесс взаимодействия пламени и горючих материалов в камере¹ и которые существенно отличаются от классической трактовки процесса возникновения и развития пожара. Рассмотрим их подробнее.

Во-первых, и это очевидно, время действия пламени, возникающего при взрыве, весьма ограничено. Это не позволяет напрямую связывать воспламенение горючих материалов при взрыве с их характеристиками, полученными в стандартных стационарных условиях. В подтверждение этого тезиса можно обратить внимание на результаты экспериментальных взрывов смеси газа *пропан – воздух* в камере объемом 10 м³ (рис. 3 и 4). На рис. 4 видно, что внутри камеры размещено оборудование, которое согласно нормативам может воспламеняться и гореть², однако, несмотря на реализацию в экспериментах около сотни взрывов, этого не произошло. Более того, оборудование сохранило свою работоспособность. И, похоже, оно еще долго будет работать.

Вернемся к экспериментальным взрывам в камере и объясним полученный результат. Очевидно, что поверхность экспериментального оборудования за время взрыва не успевает прогреться, а углеводороды, входящие в его состав, — разложиться и воспламениться.

Во-вторых, есть момент, не совсем очевидный, но весьма существенный, отличающийся особым характером взаимодействия газов при взрыве и горючих объектов, схема которого отражена на рис. 5. В их взаимодействии можно выделить четыре последовательных этапа, характеризующихся контактом ГМ с исходной газовой смесью (1-й), с фронтом пламени (2-й), с продуктами сгорания (3-й) и с наружным воздухом (4-й).

¹ Негорючие и трудногорючие вещества и материалы не рассматриваются.

² Поверхность корпуса вентилятора окрашена, его лопасти изготовлены из пластика, кабели и шланги имеют резиновую и пластиковую основу.



Рис. 3. Экспериментальный взрыв в камере $V = 10 \text{ м}^3$
Fig. 3. The experimental explosion in the chamber $V = 10 \text{ м}^3$



Рис. 4. Оборудование внутри камеры: вентилятор, кабели, шланги и устройство воспламенения
Fig. 4. Equipment inside the chamber: fan, cables, hoses and ignition device

На первом этапе ГМ взаимодействует с исходной смесью газов, которая незначительно³ прогревается в результате адиабатического сжатия в начальный момент взрыва, что исключает возможность относиться к нему как к пожароопасному. Коротко можно охарактеризовать этот этап так: есть кислород, но нет температуры.

На втором этапе мимо объекта проходит высокотемпературный фронт пламени. Ввиду того что

³ В помещении при наличии окна избыточное давление взрыва, как правило, не превышает 0,1 бар (10 кПа).

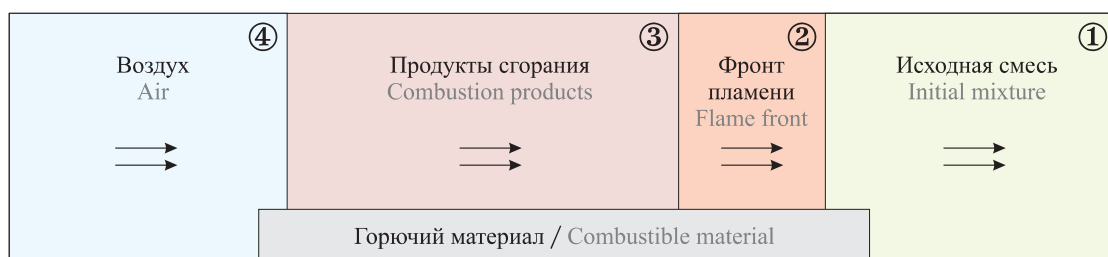


Рис. 5. Схема взаимодействия фронта пламени и ГМ
Fig. 5. Scheme of interaction of the flame front and combustible material

его ширина невелика и составляет в спокойном ламинарном пламени не превышает 1 мм, время его взаимодействия с объектом не превышает 3 мс. Для турбулентного пламени эта зона размыта, но время взаимодействия будет иметь тот же порядок. Отметим следующее: газ подготовлен к горению, в пламени он успевает разложиться на водород и углерод и сгореть. Теплосмкость ГМ на единицу объема намного выше, чем у газа, в результате чего он запаздывает с горением по сравнению с газом. Коротко этот этап можно охарактеризовать так: есть температура и кислород, но для ГМ кислорода остается столько, сколько он успеет “урвать” у газа.

На третьем этапе газы имеют высокую температуру, но в их атмосфере нет кислорода. Условия для возникновения горения в это время отсутствуют, а возникшее ранее пламя потухает, хотя пиролиз ГМ продолжается. Как известно, в этом процессе водород (и другие газы) из состава углеводорода улетучивается, а углерод остается, т. е. идет образование угля (сажи). Характеристика этапа: есть температура, но нет кислорода.

На четвертом этапе в камеру в результате имплозии поступает свежий воздух с кислородом. В этом случае ГМ, находящиеся в состоянии пиролиза, могут воспламениться. Этап характеризуется следующим: есть кислород и создаются условия для возможности воспламенения неостывших ГМ.

Из этого анализа вытекает, что условия воспламенения ГМ при газовых взрывах существенно отличаются от типично рассматриваемых, вследствие чего вопрос, воспламятся они или нет в процессе или в результате взрыва, остается открытым. Понятно, что для возникновения пожара необходимы три фактора: наличие ГМ, наличие кислорода и температура ГМ должна быть выше точки воспламенения. В отношении первого фактора естественно предположить, что в бытовом помещении всегда есть предметы, относящиеся к категории ГМ, по поводу второго — в камеру должен поступить наружный воздух, содержащий кислород. А вот что касается обязательности воспламенения ГМ при газовом взрыве при наличии второго и третьего факторов, то мы, учитывая статистику, должны поставить под сомнение этот тезис, иначе решение задачи возвращается к исходному состоянию.

Методика проведения исследования

Нестационарность и кратковременность тепловых процессов, происходящих при газовом взрыве, позволяют при анализе взаимодействия ГМ и пламени воспользоваться понятиями, введенными для случая анализа последствий воздействия на окружающую среду светового излучения при ядерных взрывах [15, 16]. Там использовалось такое понятие,

как тепловой импульс, определяемый как суммарное количество световой энергии, приходящееся на единицу площади, за все время действия источника. Несмотря на то что при ядерном взрыве источник светового потока можно представить в виде единичного источника, а при газовом взрыве источники рассредоточены по объему и присутствует в значительной мере конвективная составляющая теплового потока, понятие теплового импульса в нашей задаче оказалось вполне работоспособным.

Теоретически определить величину теплового импульса применительно к каждой точке помещения весьма проблематично, более того, это практически неразрешимая задача. Однако экспериментально это можно сделать с достаточной уверенностью, хотя и весьма приблизительно. Для этого необходимо поместить в исследуемую точку ГМ с известной реакцией на тепловой импульс, которая должна быть определена по стандартным методикам. Используя эти данные совместно с результатами такого же воздействия теплового импульса на ГМ при взрыве, можно судить о пожароопасности в окрестности ГМ. Размещение ГМ в объеме помещения может способствовать решению поставленной задачи о распределении в нем тепловых импульсов.

Замена этого способа измерением температуры и скорости потока⁴ в рассматриваемой точке не оправдана по двум причинам: во-первых, измерения трудоемки, а во-вторых, при расчете теплового потока с учетом этих параметров точность оценки вряд ли будет выше, чем при прямом варианте, т. е. с использованием ГМ.

Краткий анализ испытаний горючих материалов на воспламеняемость

Для выбора ГМ для эксперимента рассмотрены условия воспламенения ГМ, наиболее характерных для бытовых помещений: древесины, обоев, напольных покрытий и ткани. Кстати говоря, их пожарные свойства согласно современным требованиям непременно исследуются в специализированных лабораториях. Достаточно подробно исследованы свойства древесины. Ограничимся кратким анализом результатов, полученных и опубликованных в России и за рубежом [17–24].

Древесина. Свойства древесины, что вполне естественно, с точки зрения пожарной опасности различаются в зависимости от породы дерева, но значения показателей пожарной опасности вполне сравнимы. В качестве примера приведены результаты исследования пиролиза опытных образцов древесины (рис. 6–8), в частности такого экзотического дерева, как ваншан (Вьетнам). Авторами выявлено,

⁴ Тепловой поток зависит от многих других факторов.

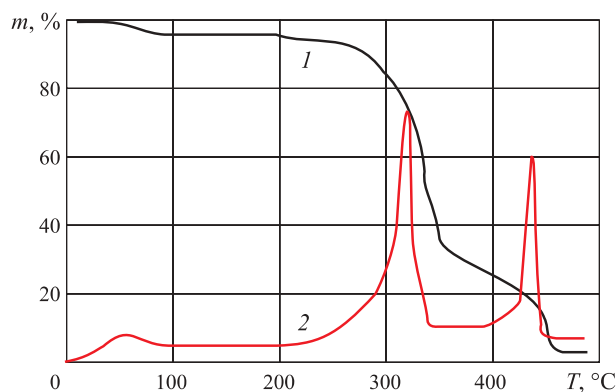


Рис. 6. Интегральная (1) и дифференциальная (2) кривые изменения массы m образца древесины ваншам

Fig. 6. Integral (1) and differential (2) weight m change curves of a wood sample

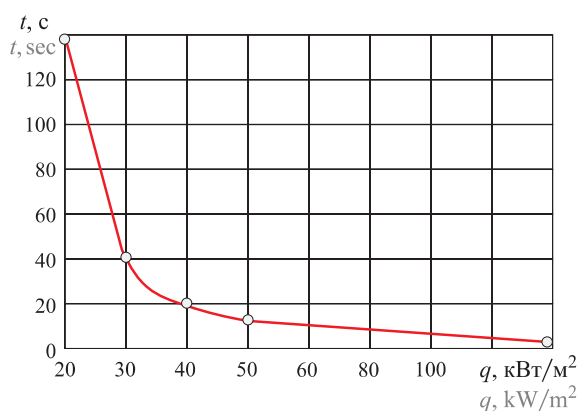


Рис. 7. Зависимость времени воспламенения сосны t от плотности теплового потока q

Fig. 7. Relationship of the time of ignition of the pine t on the specific heat flux q

что характер пиролиза древесины мало зависит от атмосферы (азотной или воздушной), в которой проходит этот процесс. На участке нагрева от нормальной температуры до 150 °С образец теряет часть массы за счет испарения абсорбированной влаги. На участке от 150 до 240 °С начинается коксование материала на поверхности образца, а выделяющиеся газы готовы к горению при наличии внешнего источника. При температурах⁵ свыше 240 °С коксование становится интенсивным, что приводит к значительной потере массы материалом образца. Особенно активно этот процесс протекает при температуре около 320 °С, после чего несколько замедляется. При дальнейшем нагреве смесь газов может самовоспламениться.

На рис. 7 приведены данные по времени воспламенения древесины сосны в зависимости от величины потока лучистой энергии, из которых видно, что найденная зависимость имеет характер, близкий

⁵ В публикациях наблюдается значительный разброс данных для разных типов древесины.

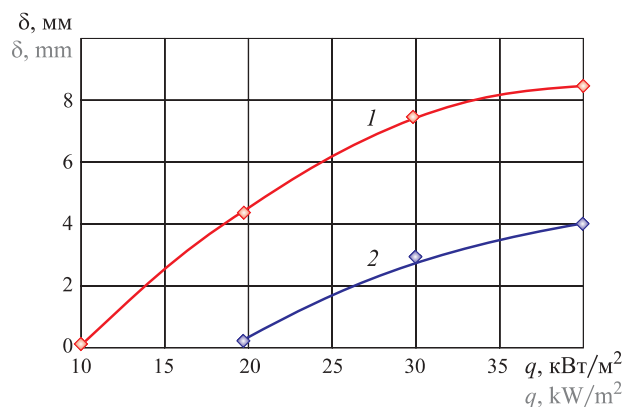


Рис. 8. Зависимость $\delta = \delta(q)$ при пламенном горении в течение 5 мин: 1 — сосна; 2 — дуб; δ — толщина коксового слоя

Fig. 8. Relationship $\delta = \delta(q)$ during flame burning for 5 min: 1 — pine; 2 — oak; δ — depth of the coke layer

к обратной пропорциональности. Известно также, что со временем в результате пиролиза толщина слоя кокса на поверхности ГМ возрастает. На рис. 8 приведена зависимость толщины такого слоя от величины потока энергии $\delta = \delta(q)$ при пламенном горении в течение 5 мин. На графике виден значительный разброс данных для разных пород древесины.

Что касается остальных трех из перечисленных выше ГМ, то нам неизвестны аналитические статьи по их пожароопасным свойствам, но есть результаты их испытаний в Испытательной лаборатории Института комплексной безопасности в строительстве при НИУ МГСУ. Отметим, что для бытовых помещений жилых домов нормативные документы никак не ограничивают применение типов тканей и обоев, имеющих свойства от КМ0 до КМ5, т. е. от слабогорючих до сильногорючих. Жесткие ограничения действуют для помещений, где возможно пребывание большого числа людей, в том числе в детских садах, учебных заведениях, холлах лестничных площадок, лифтовых, залах и др. В них допустимо применение обоев только типов КМ0, КМ1 и в отдельных случаях КМ2. Типы КМ4 и КМ5 не рассматриваются как пожаробезопасные.

Обои. В качестве примера приведем результаты испытаний обоев с виниловым покрытием на нетканой (флизелиновой) основе Digifort NW, имеющих группу воспламеняемости В2, высокую дымообразующую способность, низкую токсичность, группу горючести Г2 (рис. 9). При испытаниях на образец обоев воздействовали открытым пламенем горелки в течение 10 мин.

Напольные покрытия по своей природе характеризуются не меньшим разнообразием, чем обои. При испытаниях одного из образцов напольного покрытия марки Falquon с твердополимерной основой (состав: 75 % мел + 25 % поливинилхлорид) без применения пластификаторов, толщиной 5 мм, плот-



Рис. 9. Вид образцов обоев на флизелиновой основе после испытания

Fig. 9. Wallpaper samples on a non-woven base after testing

ностью 1514 кг/м^3 получено, что время с момента начала теплового воздействия на образец до возникновения устойчивого пламенного горения при плотности теплового потока 30 кВт/м^2 составляет 96 с ; наблюдается умеренное дымообразование; по группе по распространению пламени образец относится к РП1, т. е. к не распространяющим его.

Бумага. В табл. 2 приведены результаты испытаний образца бумаги на воспламеняемость на установке по стандартной методике без включения системы принудительного зажигания. Испытаниям подвергали бумагу “акварельную” (производитель “Лилия-Холдинг-Полиграфия”, г. Тверь), имеющую плотность 800 кг/м^3 , теплопроводность $0,14 \text{ Вт/(м}^\circ\text{C)}$, теплоемкость $1090 \dots 1500 \text{ Дж/(кг}^\circ\text{K)}$, $\delta = 0,25 \text{ мм}$. В результате воздействия пламени при взрыве происходило коксование ее поверхности и потеря светлоты⁶, степень которой оценивалась после обработки стандартными методами сканирования и компьютерной программой *Adobe Photoshop*.

В ходе эксперимента в каждом опыте после калибровки была установлена плотность теплового потока $q = 50 \text{ кВт/м}^2$, время воздействия которого на бумагу изменялось от опыта к опыту. В табл. 2 через Q_3 обозначен тепловой импульс, направленный от излучателя, а через d — степень повреждения образца:

$$Q_3 = qt; \quad (2)$$

$$d = \frac{100 - S}{100 - S_{\text{св}}}, \quad (3)$$

где t — время проведения опыта, с;

S — степень светлоты образца после облучения, %;

⁶ Термин, принятый в светотехнике.

$S_{\text{св}}$ — степень светлоты, при которой происходит самовоспламенение и полное разрушение образца, %.

В данном случае термин “степень повреждения” расходится с известным толкованием, но тем не менее он также связан с воздействием теплового потока на образец и его разрушением. Значения степени повреждения меняются от 0 до 1, т. е. от “без видимых следов повреждения” при $d = 0$ и до полного разрушения со сгоранием при $d = 1$. В табл. 2 в последней ячейке (при $d = 1$) приведена фотография индикатора после выгорания при испытании во взрывной камере.

Отметим, что на всех образцах степень повреждения была практически одинаковой с обеих сторон бумаги, хотя понятно, что воздействие теплового импульса было только с одной стороны. Это свидетельствует о том, что при расчетах прогрева листов бумаги такой толщины можно считать коэффициент теплопроводности бумаги бесконечно большим и принимать температуру образца одинаковой по всей толщине, что значительно упрощает тепловые расчеты.

На рис. 10 приведен график, демонстрирующий данные таблицы. На графике можно отметить две ступени, очень похожие (в перевернутом виде) на ступени, приведенные на рис. 6. Несмотря на то что экспериментальные данные получены при различных условиях и разных методиках обработки данных, можно провести не только качественные сравнения, но и некоторые количественные. Так, считая в определенной мере близкими характеристики дерева и бумаги, можно ожидать, что площадка на рис. 10 при $Q_3 > 300 \text{ кДж/м}^2$, когда идет активное коксование бумаги, соответствует резкому уменьшению массы деревянного образца на рис. 6 при $T > 240^\circ\text{C}$. С натяжкой можно считать, что активное коксование бумаги начинается при температурах выше 220°C , а самовоспламенение — при 320°C .

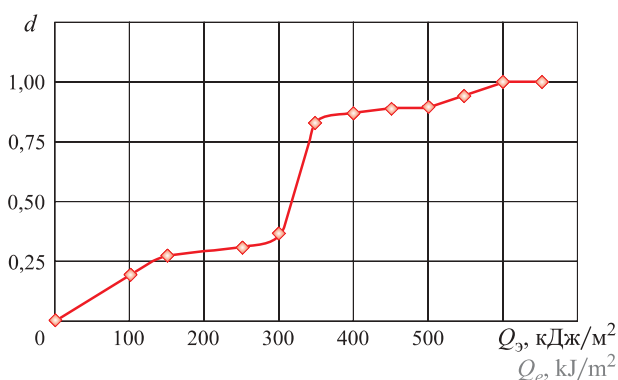
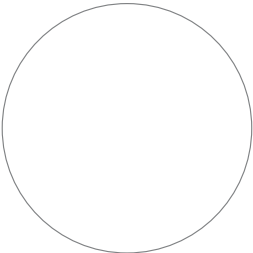
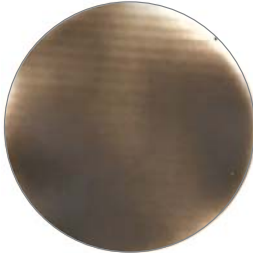
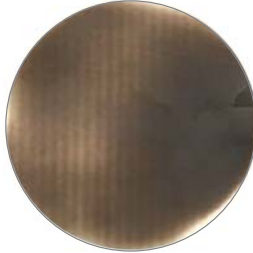
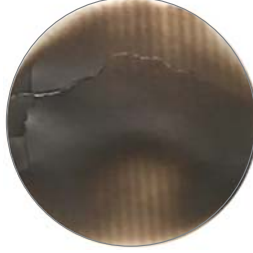
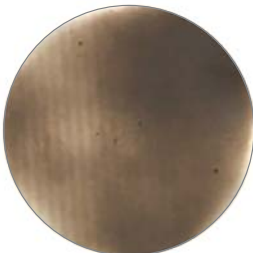


Рис. 10. Зависимость степени разрушения бумаги от теплового импульса Q_3

Fig. 10. Relationship of the degree of destruction of the paper on the value of the heat pulse Q_3

Таблица 2. Результаты испытаний образца бумаги / Table 2. Paper sample test results

Q_3 , кДж/м Q_e , kJ/m ²	d	Вид образца Sample view	Q_3 , кДж/м ² Q_e , kJ/m ²	d	Вид образца Sample view
0	0		400	0,87	
100	0,20		450	0,88	
150	0,27		500	0,89	
250	0,31		550	0,95	
300	0,37		600	0,97	
350	0,83		> 600	1,00	

Вполне естественно этим графиком пользоваться для оценки величины теплового импульса по степени повреждения бумаги.

Эксперименты

Для проведения взрыва использовалась взрывная камера объемом 10 м^3 кубической формы (см. рис. 3 и 4). Перед взрывом в оконном проеме было закреплено двустворчатое окно (рис. 11). Камеру заполняли пропаном, исходя из расчета образования стехиометрического состава; смесь перемешивали вентилятором. Зажигание смеси производилось по центру камеры. Методика проведения опытных взрывов приведена в работах [25, 26].

При испытаниях использовались специально разработанные индикаторы (рис. 12). “Чувствительным” элементом была бумага, воспламенительные свойства которой представлены в табл. 2. Индикатор состоит из кольца, на которое наклеивается контрольный лист бумаги, и скобы, обеспечивающей крепление индикатора внутри камеры. Весьма важной особенностью бумаги являлся тот факт, что в опытах лист повреждался полностью не на всех индикаторах.

Было проведено два эксперимента с закрепленными внутри камеры 35 индикаторами, схема расположения которых представлена на рис. 13.

Первый эксперимент. Определялось распределение тепловых потоков по объему камеры во время

взрыва (см. рис. 13). Индикаторы были расставлены по пяти сечениям, перпендикулярным оси камеры Z. Сравнивая цвета выделенных контуров, очерченных вокруг индикаторов, и бумаги в табл. 2, можно оценить величину тепловых импульсов, которая колебалась от 150 до 600 кДж/м^2 и более. Самыми безопасными местами оказались углы камеры, в том числе в ее передней и задней частях, а наиболее опасными — по оси камеры от ее центра до выхода и в ее верхних частях.

Очевидно, этому есть две причины. Во-первых, пламя распространяется от центра камеры во все стороны и прежде всего к выходу из нее, поэтому время взаимодействия продуктов сгорания и ГМ в области между центром и выходом наибольшее. Дополним этот тезис уточнением: пламя распространяется вверх быстрее, чем вниз, в силу действия сил Архимеда и “всплытия” горячих газов в среде холодного, поэтому в верхних точках в камере величина тепловых потоков больше [27]. Во-вторых, по оси камеры от центра до выхода наблюдаются наибольшие скорости движения газа, что делает весьма существенной конвективную составляющую теплопередачи от газов к ГМ. К углам камеры пламя приходит в последнюю очередь, когда горение в ней заканчивается и давление начинает падать. В это время становится близким этап имплозии, в течение которого наружный воздух поступает в камеру и остужает находящийся в ней газ. Собственно говоря, результаты, полученные в эксперименте, не противоречат здравому смыслу.

Представляет интерес еще одно наблюдение. На индикаторах по месту наклеивания бумаги на стальной обод (см. рис. 12) практически отсутствуют следы коксования, что можно объяснить следующим: теплоемкость металла достаточна для того, чтобы не нагреться самому и не дать нагреться образцу бумаги через клеющую прослойку. Заметим, что ширина незакоксованного кольца на бумаге больше диаметра проволоки (сравните: $6...10 \text{ мм}$ против 3 мм). Эффект влияния проволоки на бумагу при взрыве подтверждается результатами испытания обоев (см. рис. 9), которые под воздействием от-



Рис. 11. Распашное окно, вставленное в проем камеры
Fig. 11. Hinged window inserted into the chamber opening



Рис. 12. Индикатор теплового импульса: а — корпус индикатора, кольцо диаметром 90 мм из проволоки диаметром 2,5 мм; б — бумага прямоугольной формы, наклеенная на кольцо; в — вид индикатора после взрыва

Fig. 12. Heat impulse indicator: а — indicator structure, ring diameter 90 mm, wire diameter 2.5 mm; б — rectangular paper glued to the ring; в — indicator view after explosion

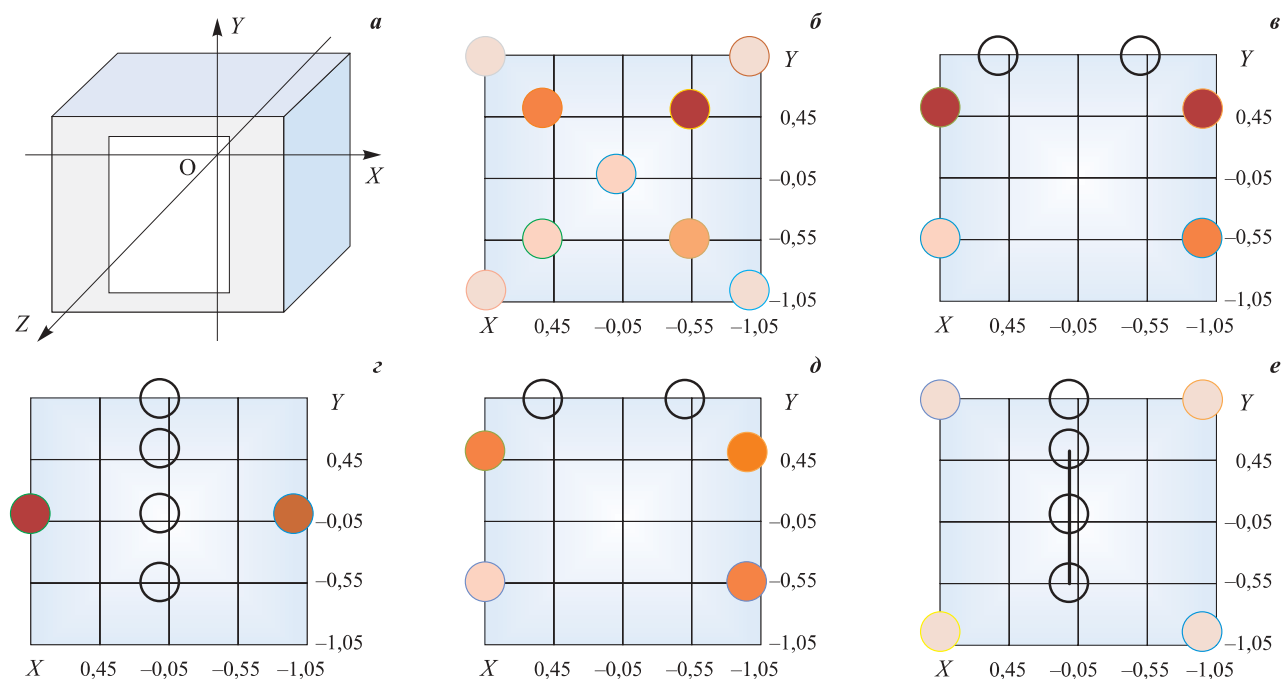


Рис. 13. Центр и начало отсчета системы координат (а) и схема расположения индикаторов теплового импульса (б–е): б — $z = 0,10$ м (у задней стенки); в — $z = 0,53$ м; г — $z = 1,05$ м (близко к центру камеры); д — $z = 1,58$ м; е — $z = 2,00$ м (у выхода из камеры)

Fig. 13. Center and origin of the coordinate system (a) and the layout of heat impulse indicators (b–e): b — $z = 0,10$ m (indicators at the rear wall); v — $z = 0,53$ m; g — $z = 1,05$ m (close to the center of the chamber); d — $z = 1,58$ m; e — $z = 2,00$ m (at the exit from the chamber)

крытого пламени горят с “неохотой”, а без него горение вовсе прекращается.

Второй эксперимент. Решалась задача определения момента воспламенения бумаги на индикаторе при газовом взрыве. Для этого внутри камеры была установлена видеокамера типа XiaomiYi Action Camera (в чехле), направленная на один из индикаторов, который по имеющемуся опыту ожидаемо должен был воспламениться. В проем камеры было установлено распашное окно реальных размеров (см. рис. 11), створки которого при газовом взрыве раскрывались нараспашку. Полученный при взрыве ход давления показан на рис. 14, а кадры с видеокамеры — на рис. 15. Показания видеокамеры и запись давления взрыва синхронизированы.

На кадрах в интервале от 5 до 124 мс видно, как развивается фронт пламени, имеющий сферическую форму. В верхней части кадра наблюдается белый прямоугольник контрольной бумаги индикатора, к которому на 124-й мс подходит фронт пламени, уже в довольно турбулизированном виде. На 250-й мс, когда все еще продолжается горение и окно уже открыто (см. рис. 14), белый лист бумаги остается целым. К 333-й мс в камере активное горение практически заканчивается и идет догорание смеси в ее углах, давление становится ниже атмосферного (несмотря на колебания), наступает этап имплозии. К 417-й мс догорают последние очаги газовой смеси,

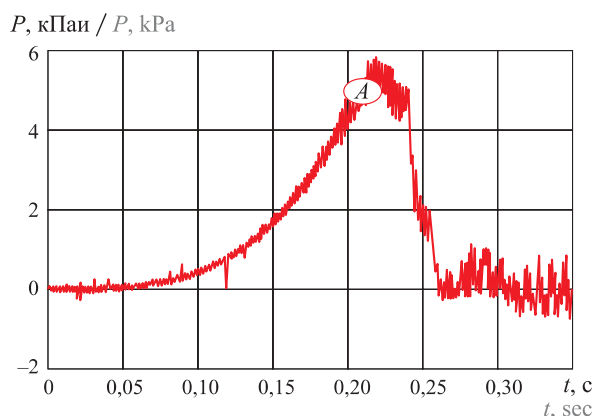


Рис. 14. Ход кривой давления при взрыве: А — момент вскрытия окна

Fig. 14. Course of the pressure curve during the explosion: А — the moment the window was opened

в камере становится темно. Далее по времени в камере газ становится прозрачным, горение полностью прекращается, а к моменту 833 мс вспыхивает бумага индикатора.

Из рис. 15 отчетливо видно, что бумага на индикаторе не воспламеняется ни во фронте пламени, ни в окружении горячих продуктов сгорания, а загорается только с наступлением этапа имплозии, с поступлением наружного воздуха в камеру, что подтверждает гипотезу об условиях возгорания ГМ при газовых взрывах в помещении.

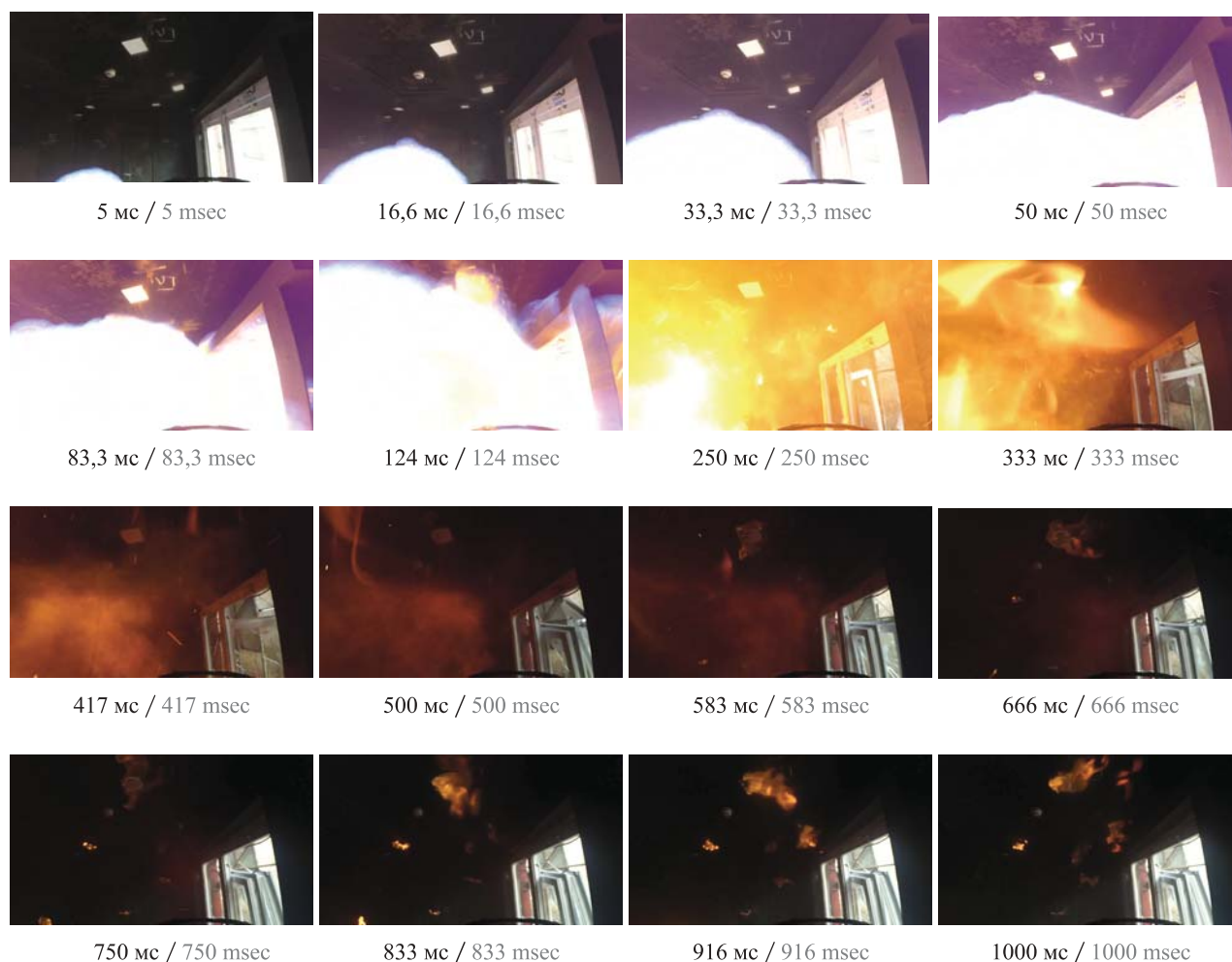


Рис. 15. Избранные кадры с видеокamеры, отражающие процесс взрыва во втором эксперименте

Fig. 15. Selected frames of the testimony of the camera

По окончании опыта была проверена работоспособность оборудования, находящегося внутри камеры: вентилятора типа ВО серии 02, резиновых шлангов, устройства розжига, проводов и др. В результате установлено, что оборудование не пострадало и может быть использовано в последующих опытах.

Выводы

1. При газовых взрывах в бытовых помещениях пожары возникают не всегда, а только в половине случаев, несмотря на то что практически всегда есть горючие материалы (твердого типа), а сам взрыв является мощным тепловым импульсом.

2. При газовом взрыве в камере, близкой по своему масштабу к реальным бытовым помещениям, было установлено, что наиболее пожароопасными зонами помещения являются части его объема от центра вверх и до оконного проема, где значения теплового импульса достигали 600 кДж/м^2 и выше. К наименее опасным относятся углы и объемы у

всех стенок (за исключением верхней), в которых термический импульс не превышает 300 кДж/м^2 .

3. Бумага толщиной $0,25 \text{ мм}$ воспламеняется только в зонах помещения, где тепловые импульсы имели значение более 600 кДж/м^2 , после завершения активной фазы взрыва, спада давления и наступления этапа имплозии, т. е. при поступлении наружного воздуха в камеру.

4. Бумага в местах склейки с проволокой диаметром $2,5 \text{ мм}$ значительно меньше подвержена воздействию теплового импульса. Оборудование, расположенное в камере, включая обычный вентилятор, шланги и провода, остаются работоспособными.

5. Подтверждена гипотеза о том, что при газовом взрыве в зоне пламени и продуктов сгорания может происходить только пиролиз горючих материалов, а их воспламенение наступает на этапе имплозии и при поступлении наружного воздуха в помещение. И только в том случае, если теплоемкость ГМ сравнительно мала, и они успевают прогреться до температуры выше температуры воспламенения.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Корольченко А. Я., Бушманов С. А. Количественная оценка величины пожарного риска // Пожаровзрывобезопасность/Fire and Explosion Safety. — 2010. — Т. 19, № 6. — С. 27–29.
2. Брушлинский Н. Н., Соколов С. В., Вагнер П. Человечество и пожары. — М. : ИПЦ “Маска”, 2007. — 142 с.
3. Брушлинский Н. Н., Соколов С. В., Григорьева М. П. Анализ основных пожарных рисков в странах мира и в России // Пожаровзрывобезопасность/Fire and Explosion Safety. — 2017. — Т. 26, № 2. — С. 72–80. DOI: 10.18322/PVB.2017.26.02.72-80.
4. America Burning: The Report of the National Commission on Fire Prevention and Control / Neville A. E., Tipton H. D., Bland R. E. (eds.). — Washington : U. S. Government Printing Office, 1973. — 177 p.
5. America Burning Revisited. National Workshop — Tyson’s Corner, Virginia. — Washington : FEMA, 1987. — 141 p.
6. Hylton J. G. Haynes. Fire loss in the United States during 2015. — Quincy, MA : National Fire Protection Association, 2016. — 50 p.
7. Fei Ren, Longhua Hu, Xiaolei Zhang, Xiepeng Sun, Jianping Zhang, Michael Delichatsios. Experimental study of transitional behavior of fully developed under-ventilated compartment fire and associated facade flame height evolution // Combustion and Flame. — 2019. — Vol. 208. — P. 235–245. DOI: 10.1016/j.combustflame.2019.07.003.
8. Santner J., Goldsborough S. S. Hot-spot induced mild ignition: Numerical simulation and scaling analysis // Combustion and Flame. — 2019. — Vol. 209. — P. 41–62. DOI: 10.1016/j.combustflame.2019.07.017.
9. Report on NC gas explosion recommends hiring more FFs. 19 November 2019. URL: <https://www.fire-rescue1.com/recruitment/articles/report-on-nc-gas-explosion-recommends-hiring-more-ffs-1TUbZv72tKPFqpad/> (дата обращения: 16.12.2019).
10. СП 12.13130.2009. Определение категорий помещений, зданий и наружных установок по взрывопожарной и пожарной опасности (с изм. № 1). URL: <http://docs.cntd.ru/document/1200071156> (дата обращения: 13.12.2019).
11. Технический регламент о требованиях пожарной безопасности : Федер. закон РФ от 22.07.2008 № 123-ФЗ (в ред. от 27.12.2018). URL: <http://docs.cntd.ru/document/902111644> (дата обращения: 16.12.2019).
12. BS EN 14797:2006. Explosion venting devices. — BSI, 2007. — 32 p.
13. NFPA 68:2018. Standard on explosion protection by deflagration venting. — Quincy, MA : National Fire Protection Association, 2018.
14. Мордасова Инна. Взрывов бытового газа в СССР было в разы меньше, чем в современной России. URL: <https://pronedra.ru/pochemu-v-sssr-vzryvov-bytovogo-gaza-bylo-v-razy-menshe-363956-pid-n.html> (дата обращения: 16.12.2019).
15. Адушкин В. В., Горбенко Б. З., Овсянников Г. А., Разоренов А. А. О методах измерения светового излучения воздушного ядерного взрыва // Ядерные испытания. Кн. 1: Ядерные испытания в Арктике. — М. : Карпуш, 2006. — Т. 2. — С. 246–262. URL: http://elbib.biblioatom.ru/text/yadernye-ispysaniya_kn1_t2_2006/go,246/ (дата обращения: 13.12.2019).
16. Griffith C. Atomic Archive: Enhanced Edition. — San Diego, California : AJ Software & Multimedia, 2002 (CD-ROM).
17. Серков Б. Б., Сивенков А. Б., Тхань Б. Д., Асеева Р. М. Термическое разложение древесины тропических пород // Лесной вестник. — 2005. — № 2. — С. 70–76.
18. Асеева Р. М., Серков Б. Б., Сивенков А. Б. Горение и пожарная опасность древесины // Пожаровзрывобезопасность/Fire and Explosion Safety. — 2012. — Т. 21, № 1. — С. 19–32.
19. Еналеев Р. Ш., Теляков Э. Ш., Чистов Ю. С., Габидуллин А. Ф. Пожарная опасность зажигания целлюлозных материалов тепловым излучением // Пожаровзрывобезопасность/Fire and Explosion Safety. — 2012. — Vol. 21, № 8. — С. 36–41.
20. Гришин А. М. Общая физико-математическая модель зажигания и горения древесины // Вестник Томского государственного университета. Математика и механика. — 2010. — № 2(10). — С. 60–70.
21. Merzhanov A. G., Averson A. E. The present state of the thermal ignition theory: An invited review // Combustion and Flame. — 1971. — Vol. 16, Issue 1. — P. 89–124. DOI: 10.1016/s0010-2180(71)80015-9.
22. Gongxin Dai, Kaige Wang, Guanyu Wang, Shurong Wang. Initial pyrolysis mechanism of cellulose revealed by in-situ DRIFT analysis and theoretical calculation // Combustion and Flame. — 2019. — Vol. 208. — P. 273–280. DOI: 10.1016/j.combustflame.2019.07.009.

23. Wasan S. R., Rauwoens P., Vierendeels J., Merci B. An enthalpy-based pyrolysis model for charring and non-charring materials in case of fire // *Combustion and Flame*. — 2010. — Vol. 157, Issue 4. — P. 715–734. DOI: 10.1016/j.combustflame.2009.12.007.
24. Vermesi I., DiDomizio M. J., Richter F., Weckman E. J., Rein G. Pyrolysis and spontaneous ignition of wood under transient irradiation: Experiments and a-priori predictions // *Fire Safety Journal*. — 2017. — Vol. 91. — P. 218–225. DOI: 10.1016/j.firesaf.2017.03.081.
25. Поландов Ю. X., Добриков С. A., Кукин Д. A. Результаты испытаний легкосбрасываемых конструкций // *Пожаровзрывобезопасность/Fire and Explosion Safety*. — 2017. — Т. 26, № 8. — С. 5–14. DOI: 10.18322/PVB.2017.26.08.5-14.
26. Polandov Yu., Korolchenko A., Dobrikov S. Gas explosion in a room with a window and passage to an adjacent room // *MATEC Web of Conferences*. — 2016. — Vol. 86. — Article No. 04031. — 7 p. DOI: 10.1051/mateconf/20168604031.
27. Xiao H., Makarov D., Sun J., Molkov V. Experimental and numerical investigation of premixed flame propagation with distorted tulip shape in a closed duct // *Combustion and Flame*. — 2012. — Vol. 159, Issue 4. — P. 1523–1538. DOI: 10.1016/j.combustflame.2011.12.003.

REFERENCES

1. A. Ya. Korolchenko, S. A. Bushmanov. Quantitative assessment of fire risk value. *Pozharovzryvobezopasnost/Fire and Explosion Safety*, 2010, vol. 19, no. 6, pp. 27–29 (in Russian).
2. N. N. Brushlinskiy, S. V. Sokolov, P. Wagner. *Chelovechestvo i pozhary* [Humanity and fires]. Moscow, IPTs Maska Publ., 2007. 142 p. (in Russian).
3. N. N. Brushlinskiy, S. V. Sokolov, M. P. Grigoryeva. Major fire risks analysis in the countries of the world and in Russia. *Pozharovzryvobezopasnost/Fire and Explosion Safety*, 2017, vol. 26, no. 2, pp. 72–80 (in Russian). DOI: 10.18322/PVB.2017.26.02.72-80.
4. A. E. Neville, H. D. Tipton, R. E. Bland (eds.). *America Burning*. The Report of the National Commission on Fire Prevention and Control. Washington, U. S. Government Printing Office, 1973. 177 p.
5. *America Burning Revisited. National Workshop — Tyson's Corner, Virginia*. Washington, FEMA, 1987. 141 p.
6. Hylton J. G. Haynes. *Fire loss in the United States during 2015*. Quincy, MA, National Fire Protection Association, 2016. 50 p.
7. Fei Ren, Longhua Hu, Xiaolei Zhang, Xiepeng Sun, Jianping Zhang, Michael Delichatsios. Experimental study of transitional behavior of fully developed under-ventilated compartment fire and associated facade flame height evolution. *Combustion and Flame*, 2019, vol. 208, pp. 235–245. DOI: 10.1016/j.combustflame.2019.07.003.
8. J. Santner, S. S. Goldsborough. Hot-spot induced mild ignition: Numerical simulation and scaling analysis. *Combustion and Flame*, 2019, vol. 209, pp. 41–62. DOI: 10.1016/j.combustflame.2019.07.017.
9. *Report on NC gas explosion recommends hiring more FFs*. 19 November 2019. Available at: <https://www.firerescue1.com/recruitment/articles/report-on-nc-gas-explosion-recommends-hiring-more-ffs-ITUbZv72tKPFqpad/> (Accessed 16 December 2019).
10. Set of rules 12.13130.2009. *Determination of categories of rooms, buildings and external installations on explosion and fire hazard (with changes No. 1)* (in Russian). Available at: <http://docs.cntd.ru/document/1200071156> (Accessed 13 December 2019).
11. *Technical regulations for fire safety requirements*. Federal Law on 22.07.2008 No. 123 (ed. 27.12.2018) (in Russian). Available at: <http://docs.cntd.ru/document/902111644> (Accessed 16 December 2019).
12. BS EN 14797:2006. *Explosion venting devices*. BSI, 2007. 32 p.
13. NFPA 68:2018. *Standard on explosion protection by deflagration venting*. Quincy, MA, National Fire Protection Association, 2018.
14. Inna Mordasova. *Household gas explosions in the USSR were many times less than in modern Russia* (in Russian). Available at: <https://pronedra.ru/pochemu-v-sssr-vzryvov-bytovogo-gaza-bylo-v-razy-menshe-363956-pid-n.html> (Accessed 16 December 2019).
15. V. V. Adushkin, B. Z. Gorbenko, G. A. Ovsyannikov, A. A. Razorenov. About the measuring methods of light radiation of air nuclear explosion. In: *Yadernyye ispytaniya. Kniga 1: Yadernyye ispytaniya v Arktike* [Nuclear tests. Book 1: Arctic nuclear tests]. Moscow, Kartush Publ., 2006, vol. 2, pp. 246–262 (in Russian). Available at: http://elib.biblioatom.ru/text/yadernye-ispytaniya_kn1_t2_2006/go,246/ (Accessed 13 December 2019).
16. C. Griffith. *Atomic Archive: Enhanced Edition*. San Diego, California, AJ Software & Multimedia, 2002 (CD-ROM).

17. B. B. Serkov, A. B. Sivenkov, B. D. Thanh, R. M. Aseeva. Thermal decomposition of some tropical wood species. *Lesnoy vestnik / Forestry Bulletin*, 2005, no. 2, pp. 70–76 (in Russian).
18. R. M. Aseeva, B. B. Serkov, A. B. Sivenkov. Combustion and fire safety of wooden materials. *Pozharovzryvobezopasnost/Fire and Explosion Safety*, 2012, vol. 21, no. 1, pp. 19–32 (in Russian).
19. R. Sh. Enaleev, E. Sh. Telyakov, Yu. S. Chistov, A. F. Gabidullin. Fire danger ignition of cellulose materials by heat radiation. *Pozharovzryvobezopasnost/Fire and Explosion Safety*, 2012, vol. 21, no. 8, pp. 36–41 (in Russian).
20. A. M. Grishin. General physical-mathematical model of ignition and burning of wood. *Vestnik Tomskogo gosudarstvennogo universiteta. Matematika i mekhanika / Tomsk State University Journal of Mathematics and Mechanics*, 2010, no. 2(10), pp. 60–70 (in Russian).
21. A. G. Merzhanov, A. E. Averson. The present state of the thermal ignition theory: An invited review. *Combustion and Flame*, 1971, vol. 16, issue 1, pp. 89–124. DOI: 10.1016/s0010-2180(71)80015-9.
22. Gongxin Dai, Kaige Wang, Guanyu Wang, Shurong Wang. Initial pyrolysis mechanism of cellulose revealed by in-situ DRIFT analysis and theoretical calculation. *Combustion and Flame*, 2019, vol. 208, pp. 273–280. DOI: 10.1016/j.combustflame.2019.07.009.
23. S. R. Wasan, P. Rauwoens, J. Vierendeels, B. Merci. An enthalpy-based pyrolysis model for charring and non-charring materials in case of fire. *Combustion and Flame*, 2010, vol. 157, issue 4, pp. 715–734. DOI: 10.1016/j.combustflame.2009.12.007.
24. I. Vermesi, M. J. DiDomizio, F. Richter, E. J. Weckman, G. Rein. Pyrolysis and spontaneous ignition of wood under transient irradiation: Experiments and a-priori predictions. *Fire Safety Journal*, 2017, vol. 91, pp. 218–225. DOI: 10.1016/j.firesaf.2017.03.081.
25. Yu. Kh. Polandov, S. A. Dobrikov, D. A. Kukin. Results of tests pressure-relief panels. *Pozharovzryvobezopasnost/Fire and Explosion Safety*, 2017, vol. 26, no. 8, pp. 5–14 (in Russian). DOI: 10.18322/PVB.2017.26.08.5-14.
26. Yu. Polandov, A. Korolchenko, S. Dobrikov. Gas explosion in a room with a window and passage to an adjacent room. *MATEC Web of Conferences*, 2016, vol. 86, article no. 04031. 7 p. DOI: 10.1051/matec-conf/20168604031.
27. H. Xiao, D. Makarov, J. Sun, V. Molkov. Experimental and numerical investigation of premixed flame propagation with distorted tulip shape in a closed duct. *Combustion and Flame*, 2012, vol. 159, issue 4, pp. 1523–1538. DOI: 10.1016/j.combustflame.2011.12.003.

Поступила 20.12.2019, после доработки 10.01.2020; принята к публикации 24.01.2020

Received 20 December 2019; Received in revised form 10 January 2020; Accepted 24 January 2020

Информация об авторах

ПОЛАНДОВ Юрий Христофорович, д-р техн. наук, профессор, профессор-консультант кафедры комплексной безопасности в строительстве, Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет, г. Москва, Российская Федерация; Author ID: 55538573200; ORCID: 0000-0003-2983-6023; e-mail: polandov@yandex.ru

КОРОЛЬЧЕНКО Дмитрий Александрович, канд. техн. наук, заведующий кафедрой комплексной безопасности в строительстве, Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет, г. Москва, Российская Федерация; Author ID: 55946060600; Researcher ID: E-1862-2017; ORCID: 0000-0002-2361-6428; e-mail: KorolchenkoDA@mgsu.ru

ЕВИЧ Андрей Андреевич, заместитель руководителя испытательной лаборатории Института комплексной безопасности в строительстве, аспирант кафедры комплексной безопасности в строительстве, Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет, г. Москва, Российская Федерация; Author ID: 57207247952; ORCID: 0000-0003-4053-6283; e-mail: evich.andrey25@gmail.com

Information about the authors

Yurii Kh. POLANDOV, Dr. Sci. (Eng.), Professor, Professor-Consultant of Department of Integrated Safety in Civil Engineering, National Research Moscow State University of Civil Engineering, Moscow, Russian Federation; Author ID: 55538573200; ORCID: 0000-0003-2983-6023; e-mail: polandov@yandex.ru

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

Andrey A. EVICH, Deputy Head of Testing Laboratory of Institute of Integrated Safety in Construction, Postgraduate Student Department of Integrated Safety in Civil Engineering, National Research Moscow State University of Civil Engineering, Moscow, Russian Federation; Author ID: 57207247952; ORCID: 0000-0003-4053-6283; e-mail: evich.andrey25@gmail.com



Перед динамическими испытаниями



Перед статическими испытаниями



После статических испытаний. Общий вид

ИСПЫТАНИЕ СРЕДСТВ ИНДИВИДУАЛЬНОЙ ЗАЩИТЫ ОТ ПАДЕНИЯ С ВЫСОТЫ

РЕКЛАМА



НАЦИОНАЛЬНЫЙ ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ
МОСКОВСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ

**СТРОИТЕЛЬНЫЙ
УНИВЕРСИТЕТ**

Контакты:
Тел.: 8 (495) 109-05-58
e-mail: ikbs@mgsu.ru,
mail@ikbs-mgsu.com

www.ikbs-mgsu.com

Влияние условий проведения испытаний в камере сгорания мелкомасштабной экспериментальной установки на дымообразующую способность древесины

© С. В. Пузач^{1✉}, В. М. Мустафин^{1,2}, Р. Г. Акперов¹

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

² Кокшетауский технический институт Комитета по чрезвычайным ситуациям МВД Республики Казахстан (Казахстан, 020000, г. Кокшетау, ул. Акан Серы, 136)

РЕЗЮМЕ

Введение. Для проведения расчетов времени блокирования путей эвакуации по потере видимости решающее значение имеет удельный коэффициент дымообразования, который определяется в маломасштабной экспериментальной установке. Однако параметры процесса дымообразования зависят от множества факторов, влияние которых изучено недостаточно. Поэтому необходимо научное обоснование условий проведения испытаний по определению удельного коэффициента дымообразования.

Цель и задачи. Целью настоящей работы является исследование влияния условий в камере сгорания на дымообразующую способность древесины. Для достижения данной цели: выполнена модификация существующей экспериментальной установки, позволяющая определять оптическую плотность дыма внутри экспозиционной камеры; проведены экспериментальные исследования горения древесины, в ходе которых измерялась оптическая плотность дыма в зависимости от расстояния между электронагревательным излучателем в камере сгорания установки и поверхностью образца исследуемого материала.

Методы. Измерения температуры и плотности теплового потока внутри камеры сгорания проводились на различном расстоянии от электронагревательного излучателя, на сертифицированном оборудовании в условно герметичном объеме экспериментальной установки.

Результаты. Эксперименты показали, что удельный коэффициент дымообразования D_m существенно зависит от условий испытаний в камере сгорания. Коэффициент дымообразования, полученный на модифицированной установке при горении древесины хвойных пород, изменяется от 22,1 до 56,9 Нп·м²/кг в режиме горения и от 82,9 до 134,5 Нп·м²/кг в режиме тления. Для хвойных древесных материалов значение D_m , используемое при моделировании пожаров, равно 57–61 Нп·м²/кг, что соизмеримо с диапазоном его изменения в проведенных экспериментах. Значения коэффициента дымообразования, полученные на стандартизированной установке (ГОСТ 12.1.044–2018), значительно выше полученных на модифицированной установке: на 233,1 Нп·м²/кг в режиме горения и на 640,5 Нп·м²/кг в режиме тления.

Заключение. Конструктивные особенности экспериментальной установки и условия в камере сгорания оказывают сильное влияние на величину удельного коэффициента дымообразования горючего материала. Для достоверного расчета времени блокирования путей эвакуации по потере видимости необходимо проведение дальнейших исследований, позволяющих научно обосновать методику определения коэффициента дымообразования.

Ключевые слова: пожар; пожарная нагрузка; тепловой поток; потеря видимости; пути эвакуации; коэффициент дымообразования.

Для цитирования: Пузач С. В., Мустафин В. М., Акперов Р. Г. Влияние условий проведения испытаний в камере сгорания мелкомасштабной экспериментальной установки на дымообразующую способность древесины // Пожаровзрывобезопасность/Fire and Explosion Safety. — 2020. — Т. 29, № 1. — С. 23–31. DOI: 10.18322/PVB.2020.29.01.23-31.

✉ Пузач Сергей Викторович, e-mail: puzachsv@mail.ru

Influence of conditions in the combustion chamber of small-scale installation on smoke generating ability of wood

© Sergey V. Puzach^{1✉}, Valikhan M. Mustafin^{1,2}, Ruslan G. Akperov¹

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

² Kokshetau Technical Institute, Committee for Emergency Situations of the Ministry of Internal Affairs of the Republic of Kazakhstan (Akan Sera St., 136, Kokshetau, 020000, Republic of Kazakhstan)

ABSTRACT

Introduction. In order to calculate the time for blocking escape routes by loss of visibility, the value of the smoke generation coefficient, which is determined in a small-scale experimental installation, is critical. However, the parameters of the smoke formation process depend on a variety of factors whose influence has not been sufficiently studied. Therefore, scientific justification of test conditions for determination of specific smoke formation factor is necessary.

Aims and purposes. The aim of this work is to study the influence of conditions in the combustion chamber on the smoke generating ability of wood. To achieve this aim: a modification of the existing experimental installation was performed, which allowed determining the optical density of smoke inside the exposure chamber; experimental studies of burning of wood were carried out, during which the optical density of the smoke was measured on the different distances between the electric heating emitter in the combustion chamber of the installation and the surface of the sample of the material under study.

Methods. Measurements of temperature and heat flux density inside the combustion chamber were carried out at different distances from the electric radiator, using certified equipment in a conditionally sealed volume of the experimental installation.

Results. The experiments showed that the specific smoke generation coefficient significantly depends on the test conditions in the combustion chamber. The smoke generation coefficient obtained at the modified installation during the burning of coniferous wood varies within 22.1–56.9 $\text{Np}\cdot\text{m}^2/\text{kg}$ in the combustion mode and 82.9–134.5 $\text{Np}\cdot\text{m}^2/\text{kg}$ in the smoldering mode. For coniferous wood materials, the value of this coefficient used in modeling fires is 57–61 $\text{Np}\cdot\text{m}^2/\text{kg}$, which is comparable with the range of its changes in the experiments. The values of the smoke generation coefficient obtained at the standard installation GOST 12.1.044–2018 significantly exceed the values of the above coefficient obtained at the developed installation. The difference in smoke generation coefficients obtained by the proposed method and the standard method exceeded 233.1 $\text{Np}\cdot\text{m}^2/\text{kg}$ in the combustion mode and 640.5 $\text{Np}\cdot\text{m}^2/\text{kg}$ in the smoldering mode.

Conclusion. The design features of the experimental installation and the test conditions, significantly change the conditions in the combustion chamber. This fact has a strong effect on the specific smoke generation coefficient of the combustible material. Therefore, in order to calculate reliably the time of blocking evacuation routes due to loss of visibility, further investigations are necessary to substantiate scientifically the method for determining the above mentioned coefficient.

Keywords: fire; fire load; heat flux; loss of visibility; escape routes; specific smoke generation coefficient.

For citation: S. V. Puzach, V. M. Mustafin, R. G. Akperov. Influence of conditions in the combustion chamber of small-scale installation on smoke generating ability of wood. *Pozharovzryvobezopasnost/Fire and Explosion Safety*, 2020, vol. 29, no. 1, pp. 23–31 (in Russian). DOI: 10.18322/PVB.2020.29.01.23-31.

✉ Sergey Viktorovich Puzach, e-mail: puzachsv@mail.ru

Введение

Безопасная эвакуация людей без индивидуальных средств защиты при пожаре возможна при условии, если время для эвакуации последнего человека из помещения или здания будет меньше времени, которое требуется для достижения опасными факторами пожара критических значений [1].

Как правило, в большинстве случаев снижение видимости в дыму представляет собой один из наиболее опасных факторов пожара, так как он в первую очередь достигает критических для человека значений. В результате его воздействия на человека может возникнуть паника, дезориентация в пространстве и отравление токсичными продуктами горения [2, 3].

Скорость образования и распространения дыма зависит от многих факторов [4–9]. Важную роль в процессе дымообразования играет химический состав и физические параметры горючей нагрузки [10], а также внешняя среда и количество окислителя [11–13]. Поэтому важно при моделировании пожара учитывать наихудшие свойства горючих материалов, которые могут быть определены только опытным путем при различных условиях испытаний в экспериментальной установке.

В настоящее время для определения пожароопасных свойств строительных и отделочных материалов используются методы, описанные в ГОСТ 12.1.044–2018. Одним из них является метод определения дымообразующей способности, который позволяет определить коэффициент дымообразования — один из ключевых параметров для расчета времени блокирования путей эвакуации по потере видимости в дыму.

Согласно исследованиям [14–18] удельный коэффициент дымообразования D_m ($\text{Нп}\cdot\text{м}^2/\text{кг}$) для необработанной древесины, полученный стандартным методом, превышает 1000 $\text{Нп}\cdot\text{м}^2/\text{кг}$, что дает основание относить ее к группе материалов с высокой дымообразующей способностью. Однако при моделировании пожара среднее значение D_m для древесины принимается равным 57 $\text{Нп}\cdot\text{м}^2/\text{кг}$ [19], что существенно меньше указанного значения. Поэтому для выполнения расчетов времени блокирования путей эвакуации по потере видимости необходимо научно обосновать условия проведения испытаний по определению удельного коэффициента дымообразования.

Целью настоящей работы является исследование влияния условий проведения испытаний в ка-

мере сгорания мелкомасштабной экспериментальной установки на дымообразующую способность древесины.

Для достижения данной цели:

- выполнена модификация существующей экспериментальной установки для определения пожарной опасности конденсированных материалов [20], что дало возможность определять оптическую плотность дыма внутри экспозиционной камеры;
- проведены экспериментальные исследования горения древесины в модифицированной установке, в ходе которых измерялась температура и плотность теплового потока в зависимости от расстояния между нагревательным элементом в камере сгорания установки и поверхностью образца исследуемого материала.

Модифицированная экспериментальная установка

Исследования проводились на экспериментальной установке для определения пожарной опасности конденсированных материалов [13], которая была модифицирована для измерения оптической плотности дыма внутри экспозиционной камеры (рис. 1).

Корпус установки выполнен из листовой нержавеющей стали толщиной $(2,0 \pm 0,1)$ мм с теплоизолирующим покрытием с внутренней стороны толщиной $(30 \pm 0,5)$ мм и состоит из трех основных частей: камеры сгорания 1, переходного рукава 2 и экспозиционной камеры 3.

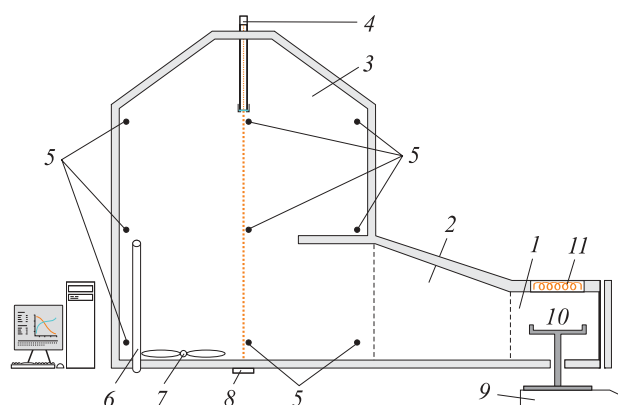


Рис. 1. Схема модифицированной экспериментальной установки: 1 — камера сгорания; 2 — переходной рукав; 3 — экспозиционная камера; 4 — лазерный модуль; 5 — термопары; 6 — зонд отбора газа; 7 — вентилятор; 8 — фоточувствительный элемент; 9 — электронные весы; 10 — держатель образца; 11 — электронагревательный излучатель

Fig. 1. Scheme of the modified experimental installation: 1 — combustion chamber; 2 — adapter sleeve; 3 — exposure camera; 4 — laser module; 5 — thermocouples; 6 — gas sampling probe; 7 — fan; 8 — photosensitive element; 9 — electronic scales; 10 — sample holder; 11 — electric heating emitter

Камера сгорания оборудована электронагревательным элементом 11 с системой водяного охлаждения, смотровым кварцевым стеклом, держателем образца 10, установленным на электронных весах 9. Переходной рукав отделен от камеры сгорания стальным шибером.

Экспозиционная камера оснащена зондом отбора газов 6, вентилятором 7, а также по всему объему низкоинерционными бронированными термопарами 5 с диапазоном измерений от минус 40 до $+1100$ °C и с погрешностью не более $\pm 1,5t$ (где t — температура, °C).

Схема камеры сгорания экспериментальной установки приведена на рис. 2. Расстояние L между нагревательным элементом в камере сгорания установки и поверхностью образца исследуемого материала изменяется с помощью системы регулировки расстояния 7.

В отличие от метода ГОСТ 12.1.044–2018 в камере сгорания модифицированной установки отсут-

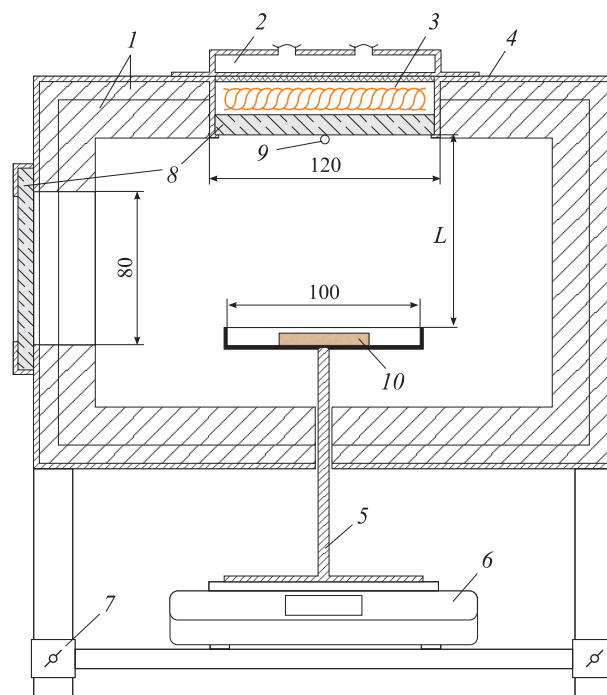


Рис. 2. Схема камеры сгорания экспериментальной установки: 1 — теплоизолирующий слой; 2 — камера водяного охлаждения; 3 — электронагревательный излучатель; 4 — наружная стенка камеры сгорания; 5 — держатель образца; 6 — электронные весы; 7 — система регулировки расстояния от электронагревательного излучателя до испытуемого образца; 8 — кварцевое стекло; 9 — низкоинерционная термопара; 10 — образец древесины

Fig. 2. Scheme of the combustion chamber of the experimental installation: 1 — heat insulation layer; 2 — water cooling chamber; 3 — electric heating radiator; 4 — outer wall of the combustion chamber; 5 — sample holder; 6 — electronic scales; 7 — system for adjusting the distance from the electric heating element to the test sample; 8 — quartz glass; 9 — low inertia thermocouple; 10 — wood sample

ствует искусственный источник зажигания (газовая горелка).

При модификации установки в центре нижней стенки экспозиционной камеры установлен фоточувствительный элемент 8 (см. рис. 1) для преобразования света в электрическую энергию. Перпендикулярно этому элементу в верхней части экспозиционной камеры находится лазерный модуль 4 с длиной волны излучения 650 нм. Чтобы избежать замутнения линзы во время огневых испытаний от нагрева, модуль установлен вне установки.

В верхней части экспозиционной камеры вставлена герметичная алюминиевая трубка, нижняя часть которой выполнена из кварцевого стекла. Через эту трубку проходит луч лазера от лазерного модуля через задымленную среду камеры во время огневых испытаний. Расстояние от нижней поверхности стекла до фоточувствительного элемента составляет 800 мм.

Для измерения плотности лучистого теплового потока использован водоохлаждаемый датчик теплового потока типа датчика Гордона ФОА-013 и регистрирующий прибор с диапазоном измерений от 0 до 100 мВ. Погрешность измерения плотности теплового потока не превышает $\pm 8\%$.

Размеры модифицированной установки отличаются от стандартизированной по ГОСТ 12.1.044–2018:

- объем камеры сгорания соответственно 0,012 и 0,003 м³;
- объем экспозиционной камеры соответственно 0,47 и 0,512 м³;
- общий внутренний объем соответственно 0,482 и 0,515 м³.

Как видим, общий внутренний объем модифицированной установки меньше по сравнению со стандартизированной на 6,4 %.

Методика проведения экспериментов

Испытание начинается с запуска контура нагревательного элемента включением ПК и запуска регистрирующих программ с последующей проверкой отклика датчиков.

Задается рабочая температура на поверхности нагревательного элемента t_n . Датчик теплового потока устанавливается на заданном расстоянии от его поверхности.

При выходе температуры и плотности теплового потока на установленные значения открывают заслонку переходного рукава и дверцу камеры сгорания. После этого предварительно взвешенный образец материала помещают в камеру и закрывают дверцу.

Дымообразующая способность древесины исследовалась в двух режимах горения (пламенное горе-

ние и тление). Режим определялся визуально по наличию видимой части пламени.

В ходе испытания фиксировались следующие параметры:

- масса образца (каждые 3–10 с);
- температура в объеме экспозиционной камеры;
- оптическая плотность дыма.

Удельный коэффициент дымообразования горючего материала определялся по следующей формуле (ГОСТ 12.1.044–2018):

$$D_m = \frac{V}{lm} \ln \left(\frac{I_0}{I_{\min}} \right), \quad (1)$$

где D_m — удельный коэффициент дымообразования горючего материала, Нп·м²/кг;

V — объем экспозиционной камеры, м³;

l — длина пути луча света в задымленной среде экспозиционной камеры, м;

m — масса образца, кг;

$I_0, I_{\min}$ — начальное и конечное светопропускание, %.

Калибровка электронагревательного оборудования

Для исследования процесса терморазложения образца горючего материала на различном расстоянии от электронагревательного оборудования была проведена его калибровка в отсутствие горения образца.

При этом определялись зависимости плотности теплового потока q в газовой среде камеры сгорания установки на заданном расстоянии L от поверхности нагревательного элемента при различной температуре на его поверхности t_n . Измерения проводились на расстоянии 35, 55 и 70 мм. Далее путем аппроксимации были получены значения данных параметров для других расстояний.

Результаты калибровки приведены в табл. 1. Данные табл. 1 позволяют определять плотность теплового потока на поверхности образца горючего материала, находящегося на заданном расстоянии L , при заданной температуре t_n .

Исходные данные

В качестве горючего материала использовалась древесина хвойных пород размером 30×30×3 мм и массой $(1,23 \pm 0,02)$ г (рис. 3).

Исследование влияния условий в камере сгорания на коэффициент дымообразования проводилось при различных значениях плотности падающего теплового потока, температуры на поверхности нагревательного элемента и расстояния от его поверхности до образца.

Таблица 1. Результаты калибровки электронагревательного оборудования**Table 1.** Calibration results of electrical heating equipment

$t_n, ^\circ\text{C}$, на расстоянии L , мм / $t_h, ^\circ\text{C}$, at distance L , mm											$q, \text{кВт/м}^2$ $q, \text{kW/m}^2$
85	80	75	70	65	60	55	50	45	40	35	
891	860	833	809	793	777	764	746	733	719	708	65
873	842	815	792	774	757	742	727	715	702	693	60
854	824	798	775	756	737	722	707	696	684	675	55
835	806	780	758	738	718	702	688	677	666	658	50
811	783	758	736	716	697	681	667	657	646	638	45
783	756	732	711	693	675	660	646	635	624	616	40
755	728	705	685	667	650	635	621	610	599	591	35
726	701	678	659	641	623	608	593	581	569	560	30
687	663	642	624	605	587	572	557	546	535	526	25
641	619	599	582	563	544	529	516	506	496	488	20
586	566	547	532	513	494	479	466	457	447	440	15
509	491	475	462	446	430	417	405	396	386	379	10
386	373	361	351	340	329	320	313	309	304	300	5

Расстояние до образца было принято равным 35, 55 и 70 мм. Плотность теплового потока была задана 25 и 35 кВт/м², а температура на поверхности нагревательного элемента экспериментальной установки изменялась от 526 до 685 °С.

При проведении испытаний и на экспериментальной установке, и на стандартизированной установке по методу ГОСТ 12.1.044–2018 размеры образцов древесины хвойных пород и их масса были идентичными. Расстояние от поверхности нагревательного элемента до поверхности образца составляло 60 мм.

**Рис. 3.** Образцы хвойных пород древесины для огневых испытаний**Fig. 3.** Samples of coniferous woods for fire tests

Результаты экспериментов и их анализ

Вид образцов древесины до и после испытаний представлен на рис. 4.

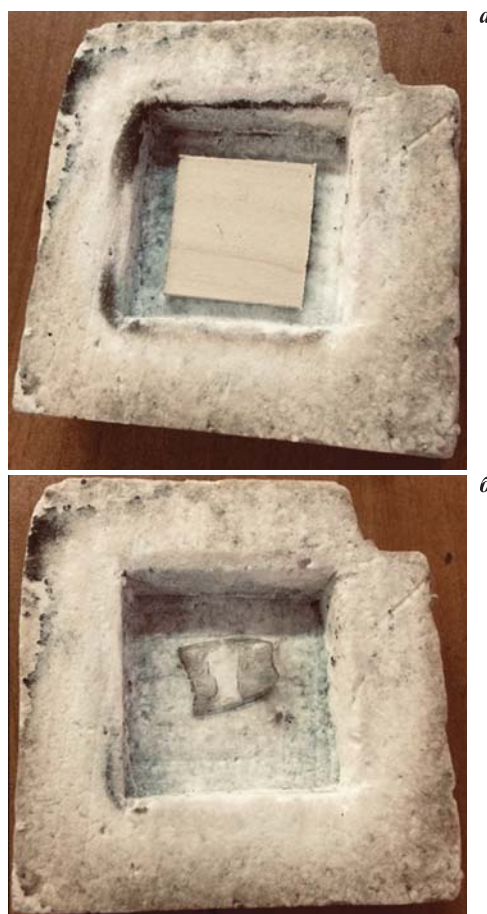
**Рис. 4.** Образец древесины до (а) и после (б) огневых испытаний**Fig. 4.** Sample of coniferous woods before (a) and after (b) fire tests

Таблица 2. Влияние условий в камере сгорания на величину удельного коэффициента дымообразования древесины
Table 2. Influence of conditions in the combustion chamber on the value of specific smoke generation coefficient of wood

Номер эксперимента No. experiment	Режим испытания Test mode	$q, \text{ кВт/м}^2$ $q, \text{ kW/m}^2$	$L, \text{ мм}$ $L, \text{ mm}$	$t_{\text{н}}, ^\circ\text{C}$ $t_{\text{h}}, ^\circ\text{C}$	$t_{\text{о}}, ^\circ\text{C}$ $t_{\text{o}}, ^\circ\text{C}$	$D_m, \text{ Нп}\cdot\text{м}^2/\text{кг}$ $D_m, \text{ Np}\cdot\text{m}^2/\text{kg}$
1	Горение Combustion	35	70	685	309	56,9
2		35	70	685	309	42,8
3		35	70	685	309	44,8
4		35	55	635	282	33,6
5		35	55	635	282	29,5
6		35	55	635	282	23,2
7		35	35	591	273	22,1
8		35	35	591	273	26,4
9		35	35	591	273	30,4
10	Тление Smoldering	25	70	624	239	100,9
11		25	70	624	239	134,5
12		25	70	624	239	120,5
13		25	55	572	224	85,7
14		25	55	572	224	98,4
15		25	55	572	224	96,2
16		25	35	526	218	82,9
17		25	35	526	218	98,6
18		25	35	526	218	89,4
19*	Горение Combustion	35	60	766	—	290
20*	Тление Smoldering	35	60	766	—	775
21*	Smoldering	25	60	700	—	560

* Стандартный метод испытаний по ГОСТ 12.1.044–2018.
 Standard test method GOST 12.1.044–2018.

Результаты огневых испытаний показали, что в режиме пламенного горения и в режиме тления значения коэффициента дымообразования различаются и существенно меняются в зависимости от условий в камере сгорания (табл. 2 и рис. 5) (где t_o — температура поверхности образца, $^\circ\text{C}$).

Из табл. 2 видно, что значение коэффициента дымообразования существенно зависит от расстояния между поверхностями нагревательного элемента и образца, так как на различном расстоянии при одинаковой плотности теплового потока температура t_o на поверхности образца различна, что в свою очередь значительно влияет на процесс дымообразования.

Коэффициент дымообразования, полученный на модифицированной установке, изменялся от 22,1 до 56,9 Нп·м²/кг в режиме горения и от 82,9 до 134,5 Нп·м²/кг в режиме тления. Таким образом, разница в значениях коэффициента дымообразования составляла 34,8 Нп·м²/кг в режиме горения и 51,6 Нп·м²/кг в режиме тления.

Для хвойных древесных материалов интервал значений коэффициента D_m , используемый при моделировании пожаров, равен 57–61 Нп·м²/кг [19], что соизмеримо с диапазоном его изменения в проведенных экспериментах.

В связи с этим научное обоснование правильности выбора данного коэффициента играет решающую роль при расчете времени блокирования путей эвакуации по потере видимости.

Одновременно с огневыми испытаниями на модифицированной экспериментальной установке были проведены испытания на стандартизированной установке по методу ГОСТ 12.1.044–2018 (см. рис. 5).

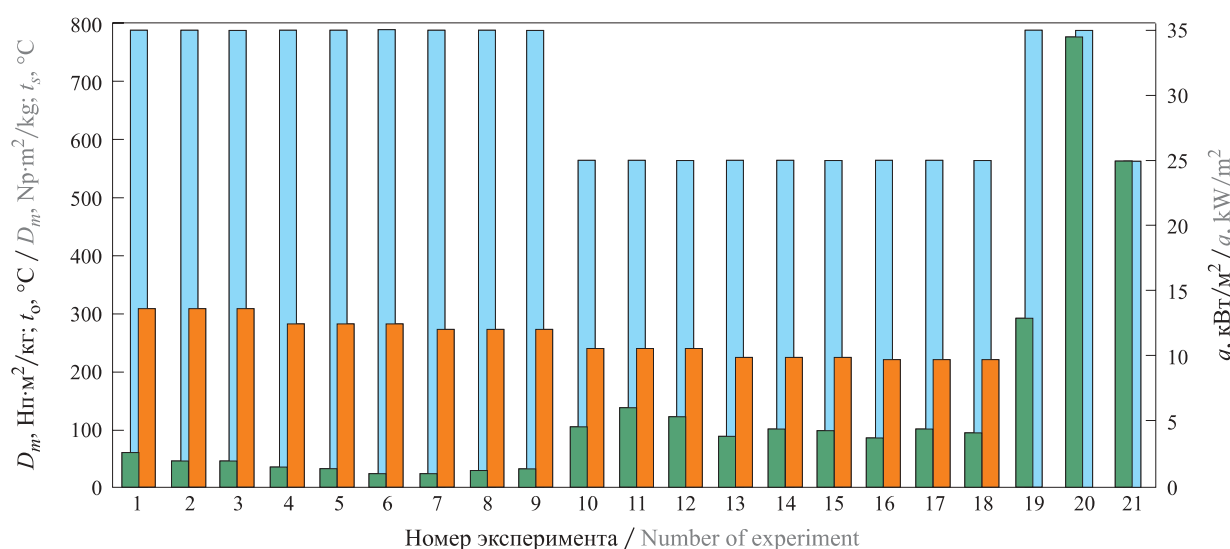


Рис. 5. Результаты огневых испытаний древесины: ■ — коэффициент дымообразования; ■ — температура на поверхности образца; ■ — плотность теплового потока на поверхности образца

Fig. 5. Results of fire tests of wood: ■ — specific smoke generation coefficient; ■ — temperature on the surface of the sample; ■ — heat flux density on the sample surface

Из рис. 5 видно, что значения коэффициента дымообразования, полученные на стандартизированной установке (эксперименты № 19–21), значительно выше полученных на модифицированной установке (эксперименты № 1–18) — на 233,1 Нп·м²/кг в режиме горения и на 640,5 Нп·м²/кг в режиме тления.

Основные отличия модифицированной установки от стандартизированной заключаются в следующем:

- в камере сгорания отсутствует искусственный источник зажигания (газовая горелка);
- электронагревательный излучатель оборудован системой водяного охлаждения;
- различаются объемы камер сгорания;
- экспозиционная камера термоизолирована в отличие от стандартизированной установки;
- образец в модифицированной установке расположен горизонтально, в стандартизированной — под углом 45°.

Вышеуказанные отличия в значениях удельного коэффициента дымообразования, полученных на раз-

ных установках, требуют проведения дальнейших исследований по влиянию конструктивных особенностей установки и условий проведения испытаний на коэффициент дымообразования.

Заключение

Конструктивные особенности экспериментальной установки и условия в камере сгорания оказывают сильное влияние на удельный коэффициент дымообразования горючего материала.

Значения коэффициента дымообразования, получаемые на модифицированной экспериментальной установке, значительно отличаются от получаемых стандартным методом.

Таким образом, для достоверного расчета времени блокирования путей эвакуации по потере видимости необходимо проведение дальнейших исследований, позволяющих научно обосновать методику определения коэффициента дымообразования.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Абашкин А. А., Карпов А. В., Ушаков Д. В., Фомин М. В., Гилетич А. Н., Комков П. М., Самошин Д. А. Пособие по применению “Методики определения расчетных величин пожарного риска в зданиях, сооружениях и строениях различных классов функциональной пожарной опасности”. — 2-е изд., испр. и доп. — М.: ВНИИПО, 2014. — 226 с.
2. Young C. J., Moss J. Smoke inhalation: Diagnosis and treatment. *Journal of Clinical Anesthesia*. — 1989. — Vol. 1, Issue 5. — P. 377–386. DOI: 10.1016/0952-8180(89)90079-2.
3. Shusterman D. J. Clinical smoke inhalation injury: systemic effects // *Occupational Medicine*. — 1993. — Vol. 8, No. 3. — P. 469–503.
4. Corches A.-M., Ulriksen L., Jomaas G. FDS Modeling of the Sensitivity of the Smoke Potential Values used in Fire Safety Strategies // *Proceedings of the 10th International Conference on Performance-Based Codes and Fire Safety Design Methods (10–12 November 2014, Queensland, Australia)*. — Red Hook, NY: Curran Associates, Inc., 2015. — P. 346–357.
5. Gyppaz F. Smoke and safety in case of fire. — Lyon, France: Nexans Research Center, 2014. — 15 p.
6. Smoke Control Design // *Performance-Based Fire Safety Design* / Hurley M. J., Rosenbaum E. R. — Boca Raton: CRC Press, Taylor & Francis Group, 2015. — P. 131–137. DOI: 10.1201/b18375-9.
7. Gross D., Loftus J. J., Robertson A. F. Method for measuring smoke from burning materials // *Symposium on Fire Test Methods — Restraint & Smoke*. — Conshohocken, PA: ASTM International, 1967. — P. 166–204. DOI: 10.1520/stp41310s.
8. Sharovarnikov A. F., Korolchenko D. A. Fighting fires of carbon dioxide in the closed buildings // *Applied Mechanics and Materials*. — 2013. — Vol. 475–476. — P. 1344–1350. DOI: 10.4028/www.scientific.net/amm.475-476.1344.
9. Kolodyazhnyi S., Kozlov V. Analytical calculation of time of reaching specific values based on visibility loss during a fire // *MATEC Web of Conferences*. — 2018. — Vol. 193, Article No. 03007. — 8 p. DOI: 10.1051/mateconf/201819303007.
10. Драйздейл Д. Введение в динамику пожаров / Пер. с англ. — М.: Стройиздат, 1990. — 424 с.
11. Rasbash D. J., Drysdale D. D. Fundamentals of smoke production // *Fire Safety Journal*. — 1982. — Vol. 5, Issue 1. — P. 77–86. DOI: 10.1016/0379-7112(82)90008-x.
12. Orzel R. A. Toxicological aspects of firesmoke: polymer pyrolysis and combustion // *Occupational Medicine*. — 1993. — Vol. 8, No. 3. — P. 414–429.
13. Пузач С. В., Сулейкин Е. В. Новый теоретико-экспериментальный подход к расчету распространения токсичных газов при пожаре в помещении // *Пожаровзрывобезопасность/Fire and Explosion Safety*. — 2016. — Т. 25, № 2. — С. 13–20. DOI: 10.18322/PVB.2016.25.02.13-20.
14. Pokrovskaya E. N., Portnov F. A. Reduction of smoke-generation ability of construction timber // *MATEC Web of Conferences*. — 2016. — Vol. 86, Article No. 04035. — 6 p. DOI: 10.1051/mateconf/20168604035.

15. Portnov F. A. The kinetic parameters of aerosols formed during combustion of modified wood // MATEC Web of Conferences. — 2018. — Vol. 251, Article No. 02023. — 8 p. DOI: 10.1051/mateconf/201825102023.
16. Pokrovskaya E. N., Nikiforova T. P. Effect of fireprotection treatment of wood on flame spread in fire // Fire-and-Explosion Hazard of Substances and Venting of Deflagrations : Proceedings of II International Seminar (11–15 August 1997, Moscow, Russia). — Moscow, VNIPO Publ., 1997. — P. 739–741.
17. Асеева Р. М., Серков Б. Б., Сивенков А. Б. Горение и пожарная опасность древесины // Пожаровзрывобезопасность/Fire and Explosion Safety. — 2012. — Т. 21, № 1. — С. 19–32.
18. Pokrovskaya E. N., Portnov F. A. The use of thermodynamic characteristics when selecting fire retardants // MATEC Web of Conferences. — 2017. — Vol. 117, Article No. 00138. — 6 p. DOI: 10.1051/mateconf/201711700138.
19. Кошмаров Ю. А. Прогнозирование опасных факторов пожара в помещении. — М. : Академия ГПС МВД России. — 2000. — 118 с.
20. Пузач С. В., Пузач В. Г., Доан В. М. К определению показателя токсичности продуктов горения горючих веществ и материалов в помещении // Пожаровзрывобезопасность/Fire and Explosion Safety. — 2011. — Т. 20, № 4. — С. 4–13.

REFERENCES

1. A. A. Abashkin, A. V. Karpov, D. V. Ushakov, M. V. Fomin, A. N. Giletich, P. M. Komkov, D. A. Samoshin. *Posobiye po primeneniyu "Metodiki opredeleniya raschetnykh velichin pozhnogo riska v zdaniyakh, sooruzheniyakh i stroyeniyyakh razlichnykh klassov funktsionalnoy pozharoy opasnosti"* [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"]. 2nd ed. Moscow, VNIPO Publ., 2014. 226 p. (in Russian).
2. C. J. Young, J. Moss. Smoke inhalation: Diagnosis and treatment. *Journal of Clinical Anesthesia*, 1989, vol. 1, issue 5, pp. 377–386. DOI: 10.1016/0952-8180(89)90079-2.
3. D. J. Shusterman. Clinical smoke inhalation injury: systemic effects. *Occupational Medicine*, 1993, vol. 8, no. 3, pp. 469–503.
4. A.-M. Corches, L. Ulriksen, G. Jomaas. FDS Modeling of the Sensitivity of the Smoke Potential Values used in Fire Safety Strategies. In: *Proceedings of the 10th International Conference on Performance-Based Codes and Fire Safety Design Methods (10–12 November 2014, Queensland, Australia)*. Red Hook, NY, Curran Associates, Inc., 2015, pp. 346–357.
5. F. Gyppez. *Smoke and safety in case of fire*. Lyon, France, Nexans Research Center, 2014. 15 p.
6. Smoke Control Design. In: M. J. Hurley, E. R. Rosenbaum. *Performance-Based Fire Safety Design*. Boca Raton, CRC Press, Taylor & Francis Group, 2015, pp. 131–137. DOI: 10.1201/b18375-9.
7. D. Gross, J. J. Loftus, A. F. Robertson. Method for measuring smoke from burning materials. In: *Symposium on Fire Test Methods — Restraint & Smoke*. Conshohocken, PA, ASTM International, 1967, pp. 166–204. DOI: 10.1520/stp41310s.
8. A. F. Sharovarnikov, D. A. Korolchenko. Fighting fires of carbon dioxide in the closed buildings. *Applied Mechanics and Materials*, 2013, vol. 475–476, pp. 1344–1350. DOI: 10.4028/www.scientific.net/amm.475-476.1344.
9. S. Kolodyazhnyi, V. Kozlov. Analytical calculation of time of reaching specific values based on visibility loss during a fire. *MATEC Web of Conferences*, 2018, vol. 193, article no. 03007. 8 p. DOI: 10.1051/mateconf/201819303007.
10. D. D. Drayzdel. *An introduction to fire dynamics*. Chichester, John Wiley and Sons, 1985. (Russ. ed.: D. Drayzdel. *Vvedeniye v dinamiku pozharov*. Moscow, Stroyizdat, 1990. 424 p.).
11. D. J. Rasbash, D. D. Drysdale. Fundamentals of smoke production. *Fire Safety Journal*, 1982, vol. 5, issue 1, pp. 77–86. DOI: 10.1016/0379-7112(82)90008-x.
12. R. A. Orzel. Toxicological aspects of firesmoke: polymer pyrolysis and combustion. *Occupational Medicine*, 1993, vol. 8, no. 3, pp. 414–429.
13. S. V. Puzach, E. V. Suleykin. New united theoretical and experimental approach to the calculation of the distribution of toxic gases in case of fire in the room. *Pozharovzryvobezopasnost/Fire and Explosion Safety*, 2016, vol. 25, no. 2, pp. 13–20 (in Russian). DOI: 10.18322/PVB.2016.25.02.13-20.
14. E. N. Pokrovskaya, F. A. Portnov. Reduction of smoke-generation ability of construction timber. *MATEC Web of Conferences*, 2016, vol. 86, article no. 04035. 6 p. DOI: 10.1051/mateconf/20168604035.
15. F. A. Portnov. The kinetic parameters of aerosols formed during combustion of modified wood. *MATEC Web of Conferences*, 2018, vol. 251, article no. 02023. 8 p. DOI: 10.1051/mateconf/2018251020233.

16. E. N. Pokrovskaya, T. P. Nikiforova. Effect of fireprotection treatment of wood on flame spread in fire. In: *Fire-and-Explosion Hazard of Substances and Venting of Deflagrations. Proceedings of II International Seminar (11–15 August 1997, Moscow, Russia)*. Moscow, VNIPO Publ., 1997, pp. 739–741.
17. R. M. Aseeva, B. B. Serkov, A. B. Sivenkov. Combustion and fire safety of wooden materials. *Pozharovzryvobezopasnost/Fire and Explosion Safety*, 2012, vol. 21, no. 1, pp. 19–32 (in Russian).
18. E. N. Pokrovskaya, F. A. Portnov. The use of thermodynamic characteristics when selecting fire retardants. *MATEC Web of Conferences*, 2017, vol. 117, article no. 00138. 6 p. DOI: 10.1051/mateconf/201711700138.
19. Yu. A. Koshmarov. *Prognozirovaniye opasnykh faktorov pozhara v pomeshchenii* [The prediction of dangerous fire factors in the room]. Moscow, State Fire Academy of Ministry of Internal Affairs of Russia Publ., 2000. 118 p. (in Russian).
20. S. V. Puzach, V. G. Puzach, V. M. Doan. To definition of toxic potency of combustion products of combustible materials in compartment. *Pozharovzryvobezopasnost/Fire and Explosion Safety*, 2011, vol. 20, no. 4, pp. 4–13 (in Russian).

Поступила 20.09.2019, после доработки 25.10.2019;

принята к публикации 03.12.2019

Received 20 September 2019; Received in revised form 25 October 2019;

Accepted 3 December 2019

Информация об авторах

ПУЗАЧ Сергей Викторович, д-р техн. наук, профессор, заслуженный деятель науки РФ, начальник кафедры инженерной теплофизики и гидравлики, Академия Государственной противопожарной службы МЧС России, г. Москва, Российская Федерация; Author ID: 7003537835; Researcher ID: U-2907-2019; ORCID: 0000-0001-7234-1339; e-mail: pzachsv@mail.ru

МУСТАФИН Валихан Мухтарович, преподаватель кафедры оперативно-тактических дисциплин, Кокшетауский технический институт Комитета по чрезвычайным ситуациям МВД Республики Казахстан, г. Кокшетау, Казахстан; адъюнкт, Академия Государственной противопожарной службы МЧС России, г. Москва, Российская Федерация; ORCID: 0000-0001-8391-7241; e-mail: GeneralPK@bk.ru

АКПЕРОВ Руслан Гянджавиевич, канд. техн. наук, преподаватель кафедры пожарной безопасности в строительстве, Академия Государственной противопожарной службы МЧС России, г. Москва, Российская Федерация; ORCID: 0000-0002-2524-8710; e-mail: akperov01@mail.ru

Information about the authors

Sergey V. PUZACH, Dr. Sci. (Eng.), Professor, Honoured Scientist of the Russian Federation, Head of Thermal Physics and Hydraulic Department, State Fire Academy of Emercom of Russia, Moscow, Russian Federation; Author ID: 7003537835; Researcher ID: U-2907-2019; ORCID: 0000-0001-7234-1339; e-mail: pzachsv@mail.ru

Valikhan M. MUSTAFIN, Lecturer of Operational and Tactical Disciplines Department, Kokshetau Technical Institute of the Committee for Emergency Situations of the Ministry of Internal Affairs of the Republic of Kazakhstan, Kokshetau, Kazakhstan; Postgraduate Student, State Fire Academy of Emercom of Russia, Moscow, Russian Federation; ORCID: 0000-0001-8391-7241; e-mail: GeneralPK@bk.ru

Ruslan G. AKPEROV, Cand. Sci. (Eng.), Lecturer of Fire Safety in Building Department, State Fire Academy of Emercom of Russia, Moscow, Russian Federation; ORCID: 0000-0002-2524-8710; e-mail: akperov01@mail.ru

Пожарная опасность текстильных материалов на основе полиэфирных волокон для вагонов железнодорожного транспорта

© А. Ю. Шебеко¹, Н. И. Константинова^{1✉}, С. Г. Цариченко²

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

² ООО «АТЛАС» (Россия, 115191, г. Москва, ул. Новая Заря, 6)

РЕЗЮМЕ

Введение. Широкое применение для обустройства пассажирских вагонов (шторы, обивка и чехлы кресел и диванов, постельные принадлежности) имеют ткани из огнезащищенных, химически модифицированных полиэфирных волокон, удовлетворяющие зарубежным требованиям. Экспериментальные исследования параметров пожарной опасности таких трудновоспламеняемых тканей согласно российским требованиям к материалам для отделки вагонов показали невозможность достижения нормативных критериев по токсичности продуктов горения и дымообразующей способности из-за особенностей процесса их термического разложения. Поэтому важной задачей является проведение комплексных исследований по обоснованию возможности установления реально приемлемых численных значений критериев токсичности продуктов горения и дымообразования.

Проблематика вопроса. Особенностью термического разложения полиэтилентерефталата (ПЭТФ) является его способность при высоких температурах находиться в вязкотекучем состоянии. Наиболее эффективный метод огнезащиты волокон из ПЭТФ — химическое модифицирование на стадии их получения за счет введения в процессе синтеза фосфорорганических функциональных соединений. Широкое применение в обустройстве вагонов огнезащищенных тканей значительно сдерживается из-за их несоответствия требованиям по дымообразующей способности и показателю токсичности продуктов горения.

Результаты и их обсуждение. Введение в полимерную цепь ПЭТФ замедлителей горения, не влияющих на условия технологической переработки, возможно при их содержании не более 10 % (масс.). Такое количество антипирена обеспечивает устойчивость материала к воспламенению и распространению пламени по поверхности, отсутствие образования горящего расплава, но не изменяет существенно показатель токсичности продуктов горения и коэффициент дымообразования. Представлены экспериментальные данные по токсичности продуктов горения (выход CO и CO₂ в режиме пламенного горения) трудновоспламеняемых, медленно распространяющих пламя по поверхности тканей из огнезащищенных полиэфирных волокон. Проведено сопоставление результатов определения показателя токсичности продуктов горения для тканей с результатами расчетов обобщенного индекса токсичности CIT_g.

Выводы. Установлено критериальное значение CIT_g(0,75) для оценки возможности применения текстильных материалов в спальнях вагонов железнодорожного транспорта, соответствующее показателю токсичности продуктов горения от 34 до 52 мг/м³ (43 мг/м³ ± 20 %), что свидетельствует о возможности применения тканей с показателем токсичности продуктов горения HCl₅₀ ≥ 35 мг/м³. Разработаны предложения по совершенствованию требований пожарной безопасности к текстильным материалам, применяемым в пассажирских вагонах железной дороги.

Ключевые слова: внутренняя отделка вагонов; полиэтилентерефталат; огнезащищенные полиэфирные волокна; токсичность продуктов горения; дымообразующая способность.

Для цитирования: Шебеко А. Ю., Константинова Н. И., Цариченко С. Г. Пожарная опасность текстильных материалов на основе полиэфирных волокон для вагонов железнодорожного транспорта // Пожаровзрывобезопасность/Fire and Explosion Safety. — 2020. — Т. 29, № 1. — С. 32–42. DOI: 10.18322/PVB.2020.29.01.32-42.

✉ Константинова Наталья Ивановна, e-mail: firelab_vniipo@mail.ru

Fire hazard of textile materials based on polyester fibers for rail vehicles

© Aleksey Yu. Shebeko¹, Nataliya I. Konstantinova^{1✉}, Sergey G. Tsarichenko²

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

² Open Liability Company "ATLAS" (Novaya Zarya St., 6, Moscow, 115191, Russian Federation)

ABSTRACT

Introduction. Wide application for the arrangement of passenger railcars (curtains, upholstery and covers of chairs and sofas, bedding) is occupied by fabrics made of fire-proof, chemically modified polyester fibers that meet foreign requirements. An experimental study of the parameters of fire hazard of such a fire-resistant textiles according to the Russian requirements to furnish railcars showed the impossibility of achieving normative criteria on the toxicity of combustion products and smoke-forming ability because of the peculiarities of the process of thermal decomposition. Therefore, an important task is to conduct a comprehensive research on the feasibility of establishing realistic numerical values of criteria of toxicity of products of combustion and smoke generation.

Problem of the issue. A feature of the thermal decomposition of polyethylene terephthalate (PET) is its ability to be in a viscous state at high temperatures. The most effective method of fire protection of PET fibers is chemical modification at the stage of their production due to the introduction of organophosphorus functional compounds in the synthesis process. Wide application in the construction of railcars, flameproof tissue is significantly hampered by their failure to comply with the requirements for smoke generation ability and toxicity index of combustion products.

Results and discussion. Introduction in the polymer chain of PET retardants that do not affect the conditions of technological processing, possibly with their contents not more than 10 % by mass. This amount of flame retardant provides the material's resistance to ignition and flame spread on the surface, lack of education burning melt, but does not alter significantly the toxicity index of combustion products and the rate of smoke generation. Experimental data on the toxicity of combustion products (the yield of CO and CO₂ in the mode of flaming combustion) flame retardant, low flame on the surface of the fabrics, flameproof polyester fibres. A comparison of the results of determination of toxicity index of products of combustion to the results of calculations of the generalized index of toxicity (CIT_g).

Conclusions. The criterion value of CIT_g (0.75) was established for evaluating the possibility of using textile materials in railway sleeping railcars, corresponding to the index of toxicity of combustion products from 34 to 52 mg/m³ (43 mg/m³ ± 20 %), which indicates the possibility of using fabrics with the index of toxicity of combustion products HCl₅₀ ≥ 35 mg/m³. Proposals have been developed to improve fire safety requirements for textile materials used in passenger railcars.

Keywords: interior decoration of vehicles, terephthalate; fire-proof polyester fibers, toxicity of combustion products; smoke development.

For citation: A. Yu. Shebeko, N. I. Konstantinova, S. G. Tsarichenko. Fire hazard of textile materials based on polyester fibers for rail vehicles. *Pozharovzryvobezopasnost/Fire and Explosion Safety*, 2020, vol. 29, no. 1, pp. 32–42 (in Russian). DOI: 10.18322/PVB.2020.29.01.32-42.

✉ Nataliya Ivanovna Konstantinova, e-mail: firelab_vniipo@mail.ru

Введение

Вопросы, связанные с пожарной безопасностью в пассажирских вагонах железной дороги, остаются актуальными, несмотря на большое количество стандартов, норм, правил и технической документации, регламентирующих требования, направленные на обеспечение пожарной безопасности железнодорожного подвижного состава и пассажирских перевозок.

Одним из важных аспектов обеспечения пожарной безопасности является совершенствование нормативных требований и методов испытаний материалов для внутренней отделки пассажирских вагонов.

Массовое пребывание людей в ограниченном замкнутом пространстве, трудности организации эвакуации пассажиров, возможность тушения возгораний и пожаров только первичными средствами пожаротушения, отсутствие систем дымоудаления и другие обстоятельства предъявляют повышенные требования пожарной безопасности, в том числе к материалам для внутренней отделки вагонов.

Европейская практика оценки характеристик пожарной опасности отделочных материалов для пассажирских вагонов согласно EN 45545-2 [1] предусматривает определение воспламеняемости, тепловыделения, распространения пламени по поверхности,

дымообразующей способности и токсичности продуктов горения.

Значительную долю материалов, используемых для декорации и отделки пассажирских вагонов (шторы, обивка и чехлы кресел и диванов, постельные принадлежности), в мировой практике занимают выпускаемые в промышленном масштабе ткани из огнезащищенных, химически модифицированных полиэфирных волокон, обладающих рядом ценных эксплуатационных свойств — прочностью, устойчивостью к истиранию, воздействию ультрафиолетовых лучей и стирке, несминаемостью и пр.

Известные результаты испытаний тканей из волокон этого вида на пожарную опасность, проведенных в европейских лабораториях, свидетельствуют о полном соответствии их международным нормативным требованиям Морского регистра, железнодорожного пассажирского и авиационного транспорта, а также автомобильной промышленности.

В России регламентация пожарной безопасности текстильных материалов проводится по таким показателям, как воспламеняемость (по ГОСТ Р 50810), токсичность продуктов горения, коэффициент дымообразования и индекс распространения пламени по поверхности (по ГОСТ 12.1.044–89). При этом показатель токсичности текстильных материалов должен

быть не ниже 40 г/м^3 , коэффициент дымообразования — не выше $1000 \text{ м}^2/\text{кг}$; материалы должны относиться к группе трудновоспламеняемых и не распространять или медленно распространять пламя по поверхности.

Между тем аналитические и экспериментальные исследования свойств пожарной опасности тканей из огнезащищенных модифицированных полиэфирных волокон, наиболее широко применяемых для занавесей, штор, обивки мягкой мебели пассажирских вагонов, показали невозможность в ряде случаев достигнуть нормативных критериев по токсичности продуктов горения и дымообразующей способности из-за особенностей процесса их термического разложения.

Целью написания настоящей статьи является проведение комплексных исследований характеристик пожарной опасности текстильных материалов на основе полиэфирных волокон, модифицированных замедлителями горения различного типа, и обоснование возможности установления реально приемлемых численных значений показателя токсичности продуктов горения и коэффициента дымообразования. Для достижения этой цели были решены следующие основные задачи: проанализированы нормативные требования, регламентирующие пожарную безопасность материалов для внутренней отделки пассажирских вагонов железной дороги в России и за рубежом; проведены комплексные исследования оценки токсичности продуктов горения и дымообразующей способности трудновоспламеняемых текстильных материалов на основе полиэфирных волокон, модифицированных наиболее эффективными замедлителями горения; выполнен расчет обобщенного индекса токсичности, определяющего возможность применения данных материалов в вагонах железной дороги в соответствии с европейскими требованиями с точки зрения их токсикологической опасности при терморазложении и горении, для сопоставления с результатами оценки показателя токсичности продуктов горения по ГОСТ 12.1.044.

Проблематика вопроса

Особенностью термического разложения полиэтилентерефталата (ПЭТФ) является его способность при высоких температурах находиться в вязкотекучем состоянии [2–4].

Механизм термоокислительной деструкции ПЭТФ достаточно изучен, носит радикально-цепной характер и протекает первоначально с разрывом молекулярной цепи, после чего идут вторичные реакции, приводящие к выходу летучих низкомолекулярных соединений и нелетучего остатка. Путем введения замедлителей горения блокируются реакции

термолиза и существенным образом снижается интенсивность процесса горения полиэфира [5–7].

Известно, что к эффективным замедлителям горения относятся фосфорсодержащие соединения, проявляющие активность как в газовой, так и в конденсированной фазах термоокислительной деструкции ПЭТФ [8–11].

Наиболее перспективным и эффективным методом огнезащиты волокон из ПЭТФ является химическое модифицирование на стадии их получения за счет введения в процессе синтеза полиэтилентерефталата фосфорорганических функциональных соединений, способных вступать в реакцию конденсации или этерификации с концевыми группами ПЭТФ. При взаимодействии замедлителя горения с концевыми СООН-группами олигомеров ПЭТФ обеспечивается ковалентное встраивание фосфора в макромолекулу полимера [12].

Одним из таких видов огнезащищенных модифицированных полиэфирных волокон для изготовления тканей, получивших достаточно широкое применение на различных видах транспорта за рубежом, являются, например, волокна, в которых в качестве антипиренов используются оксипроизводные фосфолана, например 2-карбоксиэтилметилфосфоновая кислота, известная под торговой маркой “Тревира CS”.

Требования по пожарной безопасности в отечественных нормативных документах начала 90-х годов, предъявляемые к материалам для внутреннего обустройства пассажирских вагонов железных дорог, основаны на оценке горючести, распространения пламени, дымообразующей способности и токсичности продуктов термического разложения используемых материалов, а с 2003 г. в ВНПБ–03 “Вагоны пассажирские. Требования пожарной безопасности” были введены требования по пожарной опасности отдельно для текстильных материалов и изделий.

Дальнейшее развитие нормативной базы нашло отражение в стандартах, содержащих правила и методы исследований (испытаний) и измерений, и в принятом в 2011 г. Техническом регламенте Таможенного союза “О безопасности железнодорожного подвижного состава” (ТР ТС-001–2011) [13], согласно которому на добровольной основе осуществляется оценка соответствия продукции, в том числе на пожарную опасность.

В настоящее время в поддержку ТР ТС-001–2011 в рамках выполнения программы работ по межгосударственной стандартизации разрабатывается межгосударственный стандарт “Вагоны пассажирские локомотивной тяги. Требования пожарной безопасности. Методики испытаний по оценке пожароопасных свойств неметаллических материалов”. Разработка данного стандарта направлена на установле-

ние единых требований по обеспечению пожарной безопасности железнодорожного подвижного состава и пассажирских перевозок на межгосударственном уровне.

Существующие требования пожарной безопасности и методы оценки ее показателей для текстильных материалов и изделий, применяемых для обустройства пассажирских вагонов железной дороги (воспламеняемость, группа горючести, распространение пламени по поверхности, дымообразующая способность и токсичность продуктов горения), практически не отличаются от требований, предъявляемых к облицовочным материалам потолков, поверхностей стен, перегородок, мебели и декоративных покрытий вагонов.

Исключение составляет оценка воспламеняемости тканей, характеризующей их способность к воспламенению и определяемой временем с момента воздействия источника зажигания до устойчивого самостоятельного горения (тления).

Для оценки воспламеняемости тканей для занавесей, штор, обивки спальных полок, диванов и кресел в настоящее время применяется ГОСТ Р 50810–95. Метод оценки воспламеняемости предусматривает испытания текстильных материалов в вертикальном положении. Это объясняется тем, что при вертикальном положении образца и воздействии на него пламени снизу нагрев обусловлен переносом тепла от пламени в результате естественных конвективных процессов. Для того чтобы в испытаниях учитывалась структура материала, ткань испытывают по утку и по основе, принимая в качестве результата наименьшее значение. Кроме того, фиксируется возможность загорания хлопчатобумажной ваты, расположенной под образцом, в случае образования горящего расплава.

Распространение пламени по поверхности тканей и пленок определяют по достижению фронтом пламени контрольных отметок на образце ткани и времени его прохождения в условиях специальных испытаний по методике, аналогичной методу ГОСТ 12.1.044 (п. 4.19). Критерием является безразмерная величина — индекс распространения пламени (I), по численному значению которого осуществляется классификация материалов. Для текстильных материалов индекс распространения пламени не должен превышать 20.

Материалы, применяемые для изготовления диванов и сидений, в том числе обивочные ткани, проходят оценку пожарной опасности в конструкции по способности сопротивляться возгоранию при воздействии теплового импульса нормированной мощности — 100 г газетной бумаги (1-й метод) или газовой горелки (2-й метод), что соответствует стандартным испытаниям, принятым за рубежом [14].

Опыт испытаний по оценке вышеуказанных параметров пожарной опасности для текстильных материалов на основе огнезащищенных химически модифицированных полиэфирных волокон показал, что эффективно огнезащищенная ткань или материал на ее основе не соответствует установленным требованиям ГОСТ Р 55183–2012 по коэффициенту дымообразования и показателю токсичности продуктов горения.

Для установления возможности изменения численных значений показателей пожарной опасности химически модифицированных термопластичных волокон на основе полиэфира в нормативных требованиях по их пожаробезопасному применению в вагонах железной дороги были проведены комплексные экспериментальные исследования в условиях стандартных испытаний согласно ГОСТ 12.1.044–89 и ГОСТ Р 55183–2012.

Результаты и их обсуждение

Как уже было отмечено выше, огнезащищенные полиэфирные волокна или нити можно получить путем введения замедлителей горения в расплав полимера при его формировании, что позволяет сохранить обычную технологию их переработки. Наиболее приемлемыми с точки зрения обеспечения огнезащиты и сохранения эксплуатационных свойств остаются различные комплексные фосфоразотсодержащие замедлители горения, вступающие в реакцию взаимодействия с функциональными группами полимера. В присутствии антипиренов указанного типа происходит усиление структурирования и коксообразования, а также ингибирование окислительных процессов как в газовой, так и в конденсированной фазах [8–11]. Однако введение в полимерную цепь замедлителей горения может привести к структурной и химической неоднородности полимера, изменению его свойств, в частности плавления и вязкости расплава, что, в свою очередь, может негативно отразиться на условиях технологической переработки, поэтому их содержание, как правило, не превышает 10 % (масс.), а область оптимальных концентраций фосфора находится в пределах 0,4–0,8 % (масс.) [12].

Таким образом, модификация полиэфира в целях получения огнезащитного эффекта (устойчивости к воспламенению и распространению пламени по поверхности, отсутствия образования горящего расплава) происходит путем введения такого минимального и достаточного количества антипирена, которое не повлияет на физико-механические показатели полимера. При этом не могут существенно изменяться значения показателей токсичности продуктов горения и дымообразующей способности полимера.

Данных по исследованию влияния замедлителей горения на токсичность продуктов горения поли-

меров явно недостаточно, однако анализ имеющихся результатов экспериментов оценки токсичности текстильных материалов из огнезащищенных полиэфирных волокон позволил сделать вывод, что основными выделяющимися летучими соединениями являются оксид углерода CO и диоксид углерода CO₂ [15–19].

Результаты испытаний по ГОСТ 12.1.044–89 (п. 4.20) некоторых видов трудновоспламеняемых, медленно распространяющих пламя по поверхности огнезащищенных тканей на основе модифицированных полиэфирных волокон, наиболее широко используемых в настоящее время для отделки и декора пассажирских вагонов, представлены в табл. 1. При проведении опытов фиксировались значения концентрации CO, CO₂ и кислорода O₂.

Для оценки влияния огнезащитных составов на выход газообразных продуктов термического разложения тканей из модифицированных полиэфирных волокон проводились сравнения значений выхода

CO и CO₂ в режиме пламенного горения. Представленные данные являются обобщением полученных в ФГБУ ВНИИПО МЧС России результатов испытаний по определению показателя токсичности продуктов горения для текстильных полимерных материалов, область применения которых включает в том числе пассажирские железнодорожные вагоны. При этом в настоящей работе не было проведено какой-либо предварительной выборки экспериментальных данных (для конкретных материалов) по тому или иному критерию в силу отсутствия исчерпывающей информации о химическом составе замедлителей горения представленных на испытания полиэфирных текстильных материалов.

Из результатов экспериментов следует, что трудновоспламеняемые ткани из полиэфирных волокон, модифицированных полиэфирных волокон и смесей полиэфирных и модифицированных полиэфирных волокон в различных соотношениях могут относиться в большинстве случаев к высокоопасным по по-

Таблица 1. Количество выделившихся оксида и диоксида углерода в режиме горения (в соответствии с п. 4.20 ГОСТ 12.1.044–89) тканей различного состава на основе полиэфирных волокон

Table 1. The amount of carbon oxide and dioxide released in the combustion mode (in accordance with paragraph 4.20 of GOST 12.1.044–89) of textiles of various compositions based on polyester fibers

Номер образца Sample number	Состав ткани Composition textile	Поверхностная плотность ткани, г/м ² Surface density of the textile, g/m ²	Начальная масса, г Initial weight, g	Параметры разложения Parameters decompositions		Потеря массы, % Mass loss, %	Выход, мг/г Output, mg/g		Показатель токсичности HCl ₅₀ Indicator of toxicity HCl ₅₀	CIT _g
				$T_{\text{разл}}, ^\circ\text{C}$ $T_{\text{decomp}}, ^\circ\text{C}$	$\tau_{\text{разл}}, \text{мин}$ $\tau_{\text{decomp}}, \text{min}$		CO	CO ₂		
1	ПЭ 100 % Polyester 100 %	307	1,96	650	14	>99	132	1341	36	0,93
2	ПЭ FR* 100 % Polyester FR* 100 %	250	1,60	650	14	96	152	1313	38	0,86
3	ПЭ* 100 % (Тревир CS) Polyester* 100 % (Trevira CS)	490	3,13	650	12	96	145	1037	38	1,78
4	ПЭ* 100 % (Тревир CS) Polyester* 100 % (Trevira CS)	400	2,56	650	12	97	143	1438	40	1,56
5	ПЭ FR 60 %; ПЭ 40 % Polyester FR 60 %; Polyester 40 %	200	1,28	650	15	98	143	1323	37	1,32
6	ПЭ FR 64 %; ПЭ 36 % Polyester FR 64 %; Polyester 36 %	75	0,48	650	14	98	161	1587	36	1,52
7	ПЭ FR* 100 % Polyester FR* 100 %	335	2,14	750	9	98	217	924	27	1,43
8	ПЭ FR* 100 % Polyester FR* 100 %	330	2,11	650	9	96	205	1052	29	0,75
9	ПЭ FR* 100 % Polyester FR* 100 %	415	2,65	750	9	95	200	1164	31	0,28

* Модифицированные огнезащищенные полиэфирные волокна различных производителей.

Modified fire-resistant polyester fibers from various manufacturers.

казателю токсичности продуктов горения в соответствии с ГОСТ 12.1.044–89 (при экспозиции 30 мин показатель токсичности $\text{HCl}_{50} = 27\div 40$). Разброс численных значений параметров токсичности продуктов термического разложения ткани из огнезащитных волокон может быть связан с отличием огнезащитных свойств сырья (волокон и нитей) от разных поставщиков, а также с различиями в технологическом цикле производства готовой продукции.

Тем не менее представленные в табл. 1 данные позволяют разделить прошедшие испытания материалы по диапазонам значений показателя токсичности продуктов горения на две группы: от 27 до 31 кг/м^3 и от 36 до 40 кг/м^3 . Материалы в указанных группах характеризуются незначительными различиями в количествах оксида и диоксида углерода, выделяющихся при горении.

Введение в полиэфирные волокна эффективных огнезамедлительных систем, безусловно, повышает устойчивость текстильных материалов к воспламенению и распространению пламени по поверхности (материалы трудновоспламеняемые по ГОСТ Р 50810, медленно распространяющие пламя по поверхности в соответствии с п. 4.19 ГОСТ 12.1.044–89), но по показателю токсичности продуктов горения большинство из них остается в группе высокоопасных материалов ($\text{HCl}_{50} \leq 40$).

Анализ результатов оценки количества выхода основного токсиканта — СО в процессе горения тканей из огнезащитных полиэфирных волокон показал, что для групп образцов № 2–6 и № 7–9 оно составляет соответственно 143–161 и 200–217 мг/г , отличаются и значения показателя токсичности продуктов горения HCl_{50} — 40–36 и 27–31.

Данное обстоятельство может быть связано с различными химическими составами применяемых огнезамедлительных систем и, как следствие, с различным характером механизма их действия при термоокислительной деструкции полимера.

Основным критерием пожарной безопасности для термопластичных полиэфирных текстильных материалов, используемых в том числе в вагоностроении, остается устойчивость к воспламенению; при этом обязательно должно отсутствовать пламенное горение и образование горящего расплава, способного приводить к возгоранию пожарной нагрузки. Поэтому вполне можно допустить использование огнезащитных полиэфирных тканей, устойчивых к воспламенению и медленно распространяющих пламя по поверхности, с показателем токсичности не ниже 35 с учетом результатов анализа, изложенного ниже.

Определение показателя токсичности продуктов горения полимерных материалов в соответствии с п. 4.20 ГОСТ 12.1.044–89 подразумевает необходи-

мость измерения количественного выхода СО, СО₂, цианистого водорода HCN, оксидов азота, альдегидов и других веществ в зависимости от состава материала при анализе продуктов термоокислительного разложения и горения. Тем не менее, как правило, при проведении испытаний согласно п. 4.20 ГОСТ 12.1.044–89 контролируется выход только оксида и диоксида углерода. Покажем на примере полиэтилентерефталата, что для полиэфирных волокон практически единственными газообразными продуктами термического разложения и горения, помимо водяного пара H₂O, являются оксид и диоксид углерода. Из брутто-формулы полиэтилентерефталата $(\text{C}_{10}\text{H}_8\text{O}_4)_n$ следует, что массовая доля атомов водорода в молекуле $[\text{H}]_{\text{масс}} = 4\%$ (масс.), массовая доля атомов кислорода $[\text{O}]_{\text{масс}} = 33\%$ (масс.). Исходя из результатов измерения количественного выхода СО и СО₂, можно оценить, какая часть исходного горючего пошла на образование указанных газообразных продуктов термического разложения и горения. При этом очевидно, что на образование оксида и диоксида углерода пошла только та часть исходного горючего, которая содержит атомы углерода С. Тогда массы горючего, пошедшего на образование СО и СО₂, соответственно, без учета возможности участия в их образовании кислорода, содержащегося в исходной молекуле горючего, могут быть определены следующим образом:

$$M_{\text{CO}} = m_{\text{CO}} m_0 \cdot 0,43;$$

$$M_{\text{CO}_2} = m_{\text{CO}_2} m_0 \cdot 0,27,$$

где M_{CO} , M_{CO_2} — массы горючего, пошедшего на образование СО и СО₂, кг;

m_{CO} , m_{CO_2} — выход СО и СО₂ на единицу массы горючего, кг/кг;

m_0 — начальная масса образца исследуемого материала, кг;

0,43 и 0,27 — массовые доли углерода С в молекулах СО и СО₂ соответственно.

Таким образом, массовая доля исходного горючего $Y_{\text{CO,CO}_2}$, пошедшего на образование СО и СО₂, может быть определена по формуле:

$$Y_{\text{CO,CO}_2} = \frac{M_{\text{CO}} + M_{\text{CO}_2}}{m_0}.$$

Кроме того, исходная масса горючего расходуется на образование дымовых частиц. По результатам испытаний по ГОСТ 12.1.044–89 (п. 4.18) полиэфирные волокна относятся к материалам с высокой дымообразующей способностью. По данным табл. 2 значение коэффициента дымообразования для таких материалов находится в диапазоне от 980 до 1610 $\text{м}^2/\text{кг}$. В ряде работ (см., например, [20, 21]) показано, что коэффициент дымообразования D_m

(м²/кг) взаимосвязан с массовой долей топлива Y_s , пошедшего на образование сажевых частиц, соотношением

$$Y_s = D_m / K_m,$$

где K_m — коэффициент поглощения света, м²/кг, который изменяется сравнительно в узких пределах для полимерных материалов, древесины, а также материалов на ее основе и может быть принят для них равным 7600 м²/кг.

Таким образом, для полиэфирных волокон минимальное значение массовой доли топлива, пошедшего на образование дымовых (сажевых) частиц, составляет $Y_s = 980/7600 = 0,13$.

Исходя из вышесказанного и данных табл. 1, можно определить массовую долю исходного горючего, пошедшего на образование иных (помимо H₂O, CO и CO₂) газообразных продуктов термического разложения и горения. Так, например, для ПЭ 100 % (см. табл. 1, поз. 1) указанная массовая доля составляет (для расчета массовой доли горючего, пошедшего на образование сажевых частиц, принимается $D_m = 1500$ кг/м²):

$$\begin{aligned} Y_{other} &= 1 - [O]_{\text{масс}} - [H]_{\text{масс}} - Y_{\text{CO, CO}_2} - Y_s = \\ &= 1 - 0,33 - 0,04 - 0,42 - 0,2 = 0,01. \end{aligned}$$

Из представленного примера расчета следует, что иные (помимо CO, CO₂ и H₂O) газообразные продукты термоокисления и горения полиэфирных волокон практически отсутствуют.

Как было уже отмечено, в странах Евросоюза область применения текстильных материалов в вагонах железнодорожного транспорта регламентирована положениями EN 45545-2 [1]. Материалы обивки мягкой мебели и мест для отдыха головы в спальнях вагонов должны в соответствии с [1] отвечать следующим требованиям в части способности указанных материалов к дымообразованию при горении и терморазложении, а также токсичности продуктов горения:

- способность материала к дымообразованию $D_{s \text{ max}}$, определенная по результатам испытаний согласно ISO 5659-2 [17], должна составлять не более 200;
- обобщенный индекс токсичности CIT_g , характеризующий общее интегральное токсикологическое действие продуктов термического разложения и горения, определенный по результатам газового анализа продуктов в процессе испытаний согласно ISO 5659-2 [22], должен составлять не более 0,75.

Ввиду существенного отличия подходов, приведенных в п. 4.20 ГОСТ 12.1.044–89, ISO 5659-2 [22], EN 45545-2 [1], в целях оценки токсикологического действия продуктов термического разложения и горения полимерных материалов в настоящей работе

были проведены расчеты величины CIT_g согласно EN 45545-2 на основе результатов испытаний по ГОСТ 12.1.044–89 (п. 4.20). Разумеется, такая оценка величины CIT_g является сугубо приблизительной (ориентировочной) по причине существенных различий в методологических подходах и применяемом испытательном оборудовании (см. п. 4.20 ГОСТ 12.1.044–89 и ISO 5659-2 [22]).

Обобщенный индекс токсичности CIT_g согласно EN 45545-2 [1] рассчитывается следующим образом:

$$CIT_g = \frac{V_1 S_2}{V_2 S_1} \sum_{i=1}^{i=n} \frac{c_i}{C_i},$$

где V_1 — объем камеры испытательной установки; для получения данных, представленных в табл. 1, $V_1 = 0,11$ м³;

V_2 — номинальный характерный объем пассажирского железнодорожного вагона; согласно EN 45545-2 [1] $V_2 = 150$ м³;

S_1 — площадь поверхности материала, экспонируемой тепловой нагрузкой в условиях стандартных испытаний; согласно п. 4.20 ГОСТ 12.1.044–89 $S_1 = 1,6 \cdot 10^{-3}$ м²;

S_2 — площадь поверхности материала, экспонируемой тепловой нагрузкой в условиях развития пожара в пассажирском вагоне; согласно EN 45545-2 [1] $S_2 = 0,1$ м²;

c_i — измеренная концентрация i -го газообразного продукта термического разложения и горения в объеме камеры испытательной установки, мг/м³;

C_i — относительная концентрация i -го газообразного продукта термического разложения и горения, мг/м³; $C_i = 1380$ мг/м³ для CO, $C_i = 72000$ мг/м³ для CO₂.

Результаты расчетов CIT_g для исследованных в настоящей работе материалов представлены в табл. 1. Для определения значения показателя токсичности продуктов горения полимерных материалов по п. 4.20 ГОСТ 12.1.044–89, соответствующего критериальному значению $CIT_g = 0,75$ согласно EN 45545-2 [1], была получена зависимость CIT_g от HCl_{50} . Через экспериментальные точки методом наименьших квадратов проведена прямая, имеющая следующее уравнение: $CIT_g = 2,81 - 0,048 HCl_{50}$.

Из полученной зависимости следует, что величине $CIT_g = 0,75$, характеризующей выполнение требований EN 45545-2 [1] для материалов обивки мягкой мебели и мест для отдыха головы в спальнях железнодорожных вагонов, соответствует $HCl_{50} = 43$ мг/м³. При этом необходимо отметить следующее. Во-первых, в соответствии с требованиями EN 45545-2 [1] для “стандартных” вагонов железной дороги (вагонов электропоездов с сидячими местами) критериальное значение CIT_g составляет 1,2, ему соответствует значение $HCl_{50} = 33,5$ мг/м³, что

отвечает высказанному ранее выводу о возможности применения текстильных материалов с показателем токсичности продуктов горения HC_{50} не менее 35 мг/м^3 . Во-вторых, необходимо коснуться вопроса о точности метода определения показателя токсичности продуктов полимерных материалов, представленного в п. 4.20 ГОСТ 12.1.044–89. В соответствии с п. 4.20.4.5 ГОСТ 12.1.044–89 сходимость указанного метода при доверительной вероятности 95 % по выходу СО (мг/г) не должна превышать 15 %. При этом показатель токсичности продуктов горения определяется по результатам экспозиции биологического материала (белых мышей) и пробит-анализа результатов испытаний с различным уровнем летальности биологического материала (менее и более 50 %). Исходя из сказанного выше, можно сделать вывод, что погрешность определения показателя токсичности продуктов горения полимерных материалов в соответствии с п. 4.20 ГОСТ 12.1.044–89 составляет до 20 %. Таким образом, критериальному значению $CIT_g = 0,75$ согласно EN 45545-2 [1] для оценки возможности применения текстильных материалов в спальнях вагонов железнодорожного транспорта соответствует диапазон значений показателя токсичности продуктов полимерных материалов согласно п. 4.20 ГОСТ 12.1.044–89 от 34 до 52 мг/м^3 ($43 \text{ мг/м}^3 \pm 20 \%$). Это свидетельствует о возможности применения в вагонах железнодорожного транспорта текстильных материалов с показателем токсичности продуктов горения HCl_{50} не менее 35 мг/м^3 .

Наряду с определением токсичности продуктов разложения полиэфирных тканей, проводилась оценка их дымообразующей способности в соответст-

вии с п. 4.18 ГОСТ 12.1.044–89. Коэффициент дымообразования D_{cp} в настоящих исследованиях определялся в режиме тления — наиболее опасной стадии горения полимеров. Текстильные материалы на основе полиэфира относятся к высокоопасным по дымообразующей способности: коэффициент дымообразования находится в пределах от 1200 до $1600 \text{ м}^2/\text{кг}$ (табл. 2). Как показали проведенные исследования, модификация полимера замедлителями горения в большинстве случаев не оказывает существенного влияния на численные значения показателя, поэтому получение текстильных материалов на основе полиэфирных волокон с требуемым по существующим нормативным документам коэффициентом дымообразования менее $1000 \text{ м}^2/\text{кг}$, удовлетворяющим комплексу необходимых свойств, представляется весьма сложной задачей.

Выводы

Применяемые в настоящее время на различных видах транспорта ткани из огнезащищенных модифицированных ПЭ-волокон соответствуют существующим зарубежным нормативным требованиям пожарной безопасности.

Результаты комплексных исследований по оценке характеристик пожарной опасности огнезащищенных тканей на основе модифицированных волокон, которые характеризуются устойчивостью к воспламенению и нераспространением пламени по поверхности, в большинстве случаев показали невозможность получения материалов умеренноопасных по показателю токсичности продуктов горения и с коэффициентом дымообразования менее $1000 \text{ м}^2/\text{кг}$.

Проведено сопоставление результатов определения показателя токсичности продуктов горения для указанных выше текстильных материалов с результатами расчетов обобщенного индекса токсичности, регламентирующего возможность применения данных материалов в вагонах железной дороги в соответствии с европейскими требованиями с точки зрения их токсикологической опасности при терморазложении и горении.

Показано, что критериальному значению $CIT_g = 0,75$ согласно EN 45545-2 [1] для оценки возможности применения текстильных материалов в спальнях вагонов железнодорожного транспорта соответствует диапазон значений показателя токсичности продуктов полимерных материалов в соответствии с п. 4.20 ГОСТ 12.1.044–89 от 34 до 52 мг/м^3 ($43 \text{ мг/м}^3 \pm 20 \%$). Это свидетельствует о возможности применения в вагонах железнодорожного транспорта текстильных материалов с показателем токсичности продуктов горения HCl_{50} не менее 35 мг/м^3 .

Установлено, что модификация полимера замедлителями горения в большинстве случаев не оказы-

Таблица 2. Результаты экспериментального определения коэффициента дымообразования тканей различного состава на основе полиэфирных волокон

Table 2. Results of experimental determination of the smoke generation coefficient of fabrics of different composition based on polyester fibers

Состав ткани Composition textile	Коэффициент дымообразования, $\text{м}^2/\text{кг}$ Smoke generation coefficient, m^2/kg
ПЭ 100 % Polyester 100 %	1456–1610
ПЭ FR 100 % Polyester FR 100 %	1230–1443
ПЭ FR 100 % (Тревира CS) Polyester FR 100 % (Trevira CS)	980–1137
ПЭ FR 60 %; ПЭ 40 % Polyester FR 60 %; Polyester 40 %	1260
ПЭ FR 64 %; ПЭ 36 % Polyester FR 64 %; Polyester 36 %	1166

вает существенного влияния на численные значения коэффициента дымообразования, поэтому получение текстильных материалов на основе полиэфирных волокон с требуемым по существующим нормативным документам коэффициентом дымообразования менее 500 м²/кг и удовлетворяющим комплексу необходимых свойств пожарной безопасности практически невозможно.

Учитывая результаты настоящих исследований, имеющийся опыт оценки характеристик пожарной опасности материалов на основе огнезащищенных полиэфирных волокон, целесообразно при пересмот-

ре нормативных документов установить следующие требования пожарной безопасности к текстильным материалам, применяемым в пассажирских вагонах железной дороги:

- горючесть — трудновоспламеняемый (ГОСТ Р 50810–96);
- индекс распространения пламени — не более 20;
- коэффициент дымообразования — не более 1500 м²/кг;
- показатель токсичности при экспозиции 30 мин — не менее 35 г/м³.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. DS/EN 45545-2:2013+A1:2015. Railway applications — Fire protection on railway vehicles — Part 2: Requirements for fire behaviour of materials and components. — Brussels : CEN, 2015. — 75 p.
2. Weil E. D., Levchik S. V. Flame retardants for plastics and textiles. Practical Applications. — 2nd ed. — Munich : Carl Hanser Verlag GmbH & Co, 2015. — 398 p. DOI: 10.3139/9781569905791.
3. Aseeva R. M., Zaikov G. E. Combustion of polymer materials. Munich: Carl Hanser Verlag GmbH & Co, 1986. — 406 p.
4. Hirschler M. M. Safety, health and environmental aspects of flame retardants // Handbook of Fire Resistant Textiles / Kilinc F. S. (ed.). — Cambridge : Woodhead Publishing Limited, 2013. — P. 108–173. DOI: 10.1533/9780857098931.1.108.
5. Horrocks A. R. Technical fibres for heat and flame protection // Handbook of Technical Textiles. Vol. 2: Technical Textile Applications / Horrocks A. R., Anand S. C. (eds.). — 2nd ed. — Woodhead Publishing Limited, Elsevier Ltd., 2016. — P. 237–270. DOI: 10.1016/b978-1-78242-465-9.00008-2.
6. Horrocks A. R. Flame retardant challenges for textiles and fibres: New chemistry versus innovatory solutions // Polymer Degradation and Stability. — 2011. — Vol. 96, No. 3. — P. 377–392. DOI: 10.1016/j.polyimdeggradstab.2010.03.036.
7. Joseph P., Tretsiakova-McNally S. Melt-flow behaviours of thermoplastic materials under fire conditions: Recent experimental studies and some theoretical approaches // Materials. — 2015. — Vol. 8, No. 12. — P. 8793–8803. DOI: 10.3390/ma8125492.
8. Wazarkar K., Kathalewar M., Sabnis A. Reactive modification of thermoplastic and thermoset polymers using flame retardants: An overview // Polymer-Plastics Technology and Engineering. — 2016. — Vol. 55, Issue 1. — P. 71–91. DOI: 10.1080/03602559.2015.1038839.
9. Бесишапошникова В. И., Микрюкова О. Н., Загоруйко М. В., Штейнле В. А. Огнезащита смесовых тканей системой фосфоратосодержащих замедлителей горения // Вестник Технологического университета. — 2017. — Т. 20, № 22. — С. 69–72.
10. Salmeia K., Fage J., Liang S., Gaan S. An overview of mode of action and analytical methods for evaluation of gas phase activities of flame retardants // Polymers. — 2015. — Vol. 7, No. 3. — P. 504–526. DOI: 10.3390/polym7030504.
11. Matzen M., Kandola B., Huth C., Schartel B. Influence of flame retardants on the melt dripping behaviour of thermoplastic polymers // Materials. — 2015. — Vol. 8, No. 9. — P. 5621–5646. DOI: 10.3390/ma8095267.
12. Зубкова Н. С., Константинова Н. И. Огнезащита текстильных материалов. — М. : Институт информационных технологий, 2008. — 228 с.
13. Технический регламент Таможенного союза “О безопасности железнодорожного подвижного состава” (ТР ТС 001/2011). URL: <http://docs.cntd.ru/document/902293438> (дата обращения: 20.11.2019).
14. Dzieciol M., Huzar E. Study of compounds emitted during thermo-oxidative decomposition of polyester fabrics // Polish Journal of Chemical Technology. — 2016. — Vol. 18, No. 1. — P. 40–45. DOI: 10.1515/pjct-2016-0007.
15. van der Veen I., de Boer J. Phosphorus flame retardants: Properties, production, environmental occurrence, toxicity and analysis // Chemosphere. — 2012. — Vol. 88, No. 10. — P. 1119–1153. DOI: 10.1016/j.chemosphere.2012.03.067.
16. Braun E., Levin B. C. Polyesters: A review of the literature on products of combustion and toxicity // NBS publication, NBSIR 85–3139. — Washington : U. S. Department of Commerce, National Bureau of Standards, 1985. — 64 p. DOI: 10.6028/nbs.ir.85-3139.

17. Zubkova N. S., Karelina I. M., Zaitsev A. A., Merkulov A. A., Konstantinova N. I. Toxicity of combustion products and smoking of decorative-finishing fabrics // *Fibre Chemistry*. — 2007. — Vol. 39, Issue 3. — P. 215–217. DOI: 10.1007/s10692-007-0044-5.
18. Wesolek D., Kozłowski R. Toxic gaseous products of thermal decomposition and combustion of natural and synthetic fabrics with and without flame retardant // *Fire and Materials*. — 2002. — Vol. 26, Issue 4–5. — P. 215–224. DOI: 10.1002/fam.800.
19. Леонова Д. И. Роль антипиренов в токсичности продуктов горения полимерных материалов // *Актуальные проблемы транспортной медицины*. — 2010. — № 3(21). — С. 121–131.
20. Разработка методики расчетов видимости при моделировании пожаров полевым методом с применением FDS. Исходные данные для расчета гражданских зданий. — Екатеринбург : Ситис, 2007. — 33 с.
21. Карькин И. Н. Работа в программном комплексе FireCat. Библиотека реакций и поверхностей горения в PyroSim. — 4-я ред. — 2016. — 27 с. URL: https://pyrosim.ru/download/Firecat_FDS_fire-load_lib.pdf (дата обращения: 20.11.2019).
22. ISO 5659-2. Plastics — Smoke generation — Part 2: Determination of optical density by a single-chamber test. — 4th ed. — Geneva, Switzerland : ISO, 2017. — 49 p.

REFERENCES

1. DS/EN 45545-2:2013+A1:2015. *Railway applications — Fire protection on railway vehicles — Part 2: Requirements for fire behaviour of materials and components*. Brussels, CEN, 2015. 75 p.
2. E. D. Weil, S. V. Levchik. *Flame retardants for plastics and textiles. Practical Applications*. 2nd ed. Munich, Carl Hanser Verlag GmbH & Co, 2015. 398 p. DOI: 10.3139/9781569905791.
3. R. M. Aseeva, G. E. Zaikov. *Combustion of polymer materials*. Munich, Carl Hanser Verlag GmbH & Co, 1986. 406 p.
4. M. M. Hirschler. Safety, health and environmental aspects of flame retardants. In: F. S. Kilinc (ed.). *Handbook of Fire Resistant Textiles*. Cambridge, Woodhead Publishing Limited, 2013, pp. 108–173. DOI: 10.1533/9780857098931.1.108.
5. A. R. Horrocks. Technical fibres for heat and flame protection. In: A. R. Horrocks, S. C. Anand (eds.). *Handbook of Technical Textiles. Vol. 2: Technical Textile Applications*. 2nd ed. Woodhead Publishing Limited, Elsevier Ltd., 2016, pp. 237–270. DOI: 10.1016/b978-1-78242-465-9.00008-2.
6. A. R. Horrocks. Flame retardant challenges for textiles and fibres: New chemistry versus innovatory solutions. *Polymer Degradation and Stability*, 2011, vol. 96, no. 3, pp. 377–392. DOI: 10.1016/j.polydegradstab.2010.03.036.
7. P. Joseph, S. Tretyakova-McNally. Melt-flow behaviours of thermoplastic materials under fire conditions: Recent experimental studies and some theoretical approaches. *Materials*, 2015, vol. 8, no. 12, pp. 8793–8803. DOI: 10.3390/ma8125492.
8. K. Wazarkar, M. Kathalewar, A. Sabnis. Reactive modification of thermoplastic and thermoset polymers using flame retardants: An overview. *Polymer-Plastics Technology and Engineering*, 2016, vol. 55, issue 1, pp. 71–91. DOI: 10.1080/03602559.2015.1038839.
9. V. I. Beshaposhnikova, O. N. Mikryukova, M. V. Zagoruyko, V. A. Shteynle. Fire protection of mixed tissues by the system of phosphor-nitrogen-containing retardants of combustion. *Vestnik Tekhnologicheskogo universiteta / Herald of Technological University*, 2017, vol. 20, no. 22, pp. 69–72 (in Russian).
10. K. Salmeia, J. Fage, S. Liang, S. Gaan. An overview of mode of action and analytical methods for evaluation of gas phase activities of flame retardants. *Polymers*, 2015, vol. 7, no. 3, pp. 504–526. DOI: 10.3390/polym7030504.
11. M. Matzen, B. Kandola, C. Huth, B. Schartel. Influence of flame retardants on the melt dripping behaviour of thermoplastic polymers. *Materials*, 2015, vol. 8, no. 9, pp. 5621–5646. DOI: 10.3390/ma8095267.
12. N. S. Zubkova, N. I. Konstantinova. *Ognezashchita tekstilnykh materialov* [Fire protection of textile materials]. Moscow, MIREA — Russian Technological University Publ., 2008. 228 p. (in Russian).
13. *Technical regulation of the Customs Union “On the safety of railway rolling stock” (TR CU 001/2011)* (in Russian). Available at: <http://docs.cntd.ru/document/902293438> (Accessed 20 November 2019).
14. M. Dziecioł, E. Huzar. Study of compounds emitted during thermo-oxidative decomposition of polyester fabrics. *Polish Journal of Chemical Technology*, 2016, vol. 18, no. 1, pp. 40–45. DOI: 10.1515/pjct-2016-0007.
15. I. van der Veen, J. de Boer. Phosphorus flame retardants: Properties, production, environmental occurrence, toxicity and analysis. *Chemosphere*, 2012, vol. 88, no. 10, pp. 1119–1153. DOI: 10.1016/j.chemosphere.2012.03.067.

16. E. Braun, B. C. Levin. *Polyesters: A review of the literature on products of combustion and toxicity*. NBS Publication, NBSIR 85-3139. Washington, U. S. Department of Commerce, National Bureau of Standards, 1985. 64 p. DOI: 10.6028/nbs.ir.85-3139.
17. N. S. Zubkova, I. M. Karelina, A. A. Zaitsev, A. A. Merkulov, N. I. Konstantinova. Toxicity of combustion products and smoking of decorative-finishing fabrics. *Fibre Chemistry*, 2007, vol. 39, issue 3, pp. 215–217. DOI: 10.1007/s10692-007-0044-5.
18. D. Wesolek, R. Kozlowski. Toxic gaseous products of thermal decomposition and combustion of natural and synthetic fabrics with and without flame retardant. *Fire and Materials*, 2002, vol. 26, issue 4-5, pp. 215–224. DOI: 10.1002/fam.800.
19. D. I. Leonova. The fire retardants contribution in combustive product toxicity of polymeric materials. *Aktualnyye problemy transportnoy meditsiny / Actual Problems of Transport Medicine*, 2010, no. 3(21), pp. 121–131 (in Russian).
20. *Razrabotka metodiki raschetov vidimosti pri modelirovanii pozharov polevym metodom s primeneniym FDS. Iskhodnyye dannyye dlya rascheta grazhdanskikh zdaniy* [Development of methods for calculating the visibility of fire modeling field method using FDS. Initial data for the calculation of civil buildings]. Ekaterinburg, SITIS Publ., 2007. 33 p. (in Russian).
21. I. N. Karkin. Work in the software complex FireCat. Library reactions and surfaces of combustion in PyroSim. Revision 4, 2016. 27 p. (in Russian). Available at: https://pyrosim.ru/download/Firecat_FDS_fireload_lib.pdf (Accessed 20 November 2019).
22. ISO 5659-2. *Plastics — Smoke generation — Part 2: Determination of optical density by a single-chamber test*. 4th ed. Geneva, Switzerland, ISO, 2017. 49 p.

Поступила 15.11.2019, после доработки 26.12.2019;

принята к публикации 15.01.2020

Received 15 November 2019; Received in revised form 26 December 2019;

Accepted 15 January 2020

Информация об авторах

ШЕБЕКО Алексей Юрьевич, канд. техн. наук, начальник отдела пожарной безопасности строительных материалов, Всероссийский научно-исследовательский институт противопожарной обороны МЧС России, г. Балашиха Московской обл., Российская Федерация; Author ID: 14627996600; Researcher ID: G-1975-2016; ORCID: 0000-0002-5771-2127; e-mail: ay_shebeko@mail.ru

КОНСТАНТИНОВА Наталия Ивановна, д-р техн. наук, профессор, гл. научный сотрудник отдела пожарной безопасности строительных материалов, Всероссийский научно-исследовательский институт противопожарной обороны МЧС России, г. Балашиха Московской обл., Российская Федерация; Author ID: 57195464313; ORCID: 0000-0003-0778-0698; e-mail: firelab_vniipo@mail.ru

ЦАРИЧЕНКО Сергей Георгиевич, д-р техн. наук, заместитель генерального директора ООО “АТЛАС”, г. Москва, Российская Федерация; ORCID: 0000-0002-9807-6841; e-mail: tsarichenko_s@mail.ru

Information about the authors

Aleksey Yu. SHEBEKO, Cand. Sci. (Eng.), Head of Department of Fire Safety of Building Materials, All-Russian Research Institute for Fire Protection, Balashikha, Moscow Region, Russian Federation; Author ID: 14627996600; Researcher ID: G-1975-2016; ORCID: 0000-0002-5771-2127; e-mail: ay_shebeko@mail.ru

Nataliya I. KONSTANTINOVA, Dr. Sci. (Eng.), Professor, Chief Researcher at Department of Fire Safety of Building Materials, All-Russian Research Institute for Fire Protection, Balashikha, Moscow Region, Russian Federation; Author ID: 57195464313; ORCID: 0000-0003-0778-0698; e-mail: firelab_vniipo@mail.ru

Sergey G. TSARICHENKO, Dr. Sci. (Eng.), Deputy General Director of Open Liability Company “ATLAS”, Moscow, Russian Federation; ORCID: 0000-0002-9807-6841; e-mail: tsarichenko_s@mail.ru

Беспламенное горение древесины: параметры макрокинетики пиролиза и термоокислительного разложения

© Е. Ю. Круглов[✉], Р. М. Асеева

Академия Государственной противопожарной службы МЧС России
(Россия, 129366, г. Москва, ул. Бориса Галушкина, 4)

РЕЗЮМЕ

Введение. Беспламенному, тлеющему горению подвержены многие материалы: уголь, хлопок, торф, карбонизирующиеся полимеры и пр. Пожарная опасность тлеющего горения органических материалов состоит в том, что для инициирования процесса горения достаточно низкокалорийных источников зажигания, процесс носит скрытый характер, что затрудняет его обнаружение, и может самопроизвольно перейти в пламенный.

Цель и задачи. Цель настоящей работы состояла в определении параметров макрокинетики пиролиза и термоокислительного разложения древесины разных видов хвойных и лиственных пород методами термического анализа.

Методы. Образцы исследовали методами термического анализа в инертной и воздушной среде. Для этого использовали автоматизированную модульную систему Du Pont-9900, включающую термовесы ТГА-951, дифференциально-сканирующий калориметр ДСК-910.

Результаты. В работе установлено, что пиролиз основных компонентов древесины (гемицеллюлозы и целлюлозы) протекает по механизму нуклеации и росту ядер по закону случая R ($n = 1$) с энергиями активации, близкими по порядку величины для разных пород (98–136 кДж/моль — для гемицеллюлоз и 203–233 кДж/моль — для целлюлозы). На стадиях термоокислительного разложения компонентов древесины и гетерогенного окисления карбонизованного продукта механизмом, контролирующим процесс, становится диффузия типа D3 (D4) в сферической геометрии. Эффективная энергия активации разложения гемицеллюлоз снижается до 90,9–95,8 кДж/моль, а целлюлозы — до 138,3–160,9 кДж/моль. В беспламенное, тлеющее горение материала существенный вклад вносит реакция гетерогенного окисления карбонизованных продуктов. Она является диффузионно-контролируемой и характеризуется высокими значениями энергии активации (до 285 кДж/моль).

Вывод. Результаты работы позволяют оценить макрокинетические параметры пиролиза и термоокислительного разложения древесины разных пород при беспламенном горении. Полученные данные могут использоваться как основные параметры при моделировании гетерогенного горения древесины разных пород в зданиях.

Ключевые слова: тлеющее горение; термическое поведение; макрокинетические параметры; пиролиз древесины; термогравиметрический анализ.

Благодарности: Авторы выражают благодарность Ю. К. Нагановскому за помощь в проведении экспериментов по термическому анализу.

Для цитирования: Круглов Е. Ю., Асеева Р. М. беспламенное горение древесины: параметры макрокинетики пиролиза и термоокислительного разложения // Пожаровзрывобезопасность/Fire and Explosion Safety. — 2020. — Т. 29, № 1. — С. 43–54. DOI: 10.18322/PVB.2020.29.01.43-54.

✉ Круглов Евгений Юрьевич, e-mail: 89268196698@mail.ru

Flameless burning of wood: parameters of macrokinetics of pyrolysis and thermo-oxidative decomposition

© Evgeniy Yu. Kruglov[✉], Roza M. Aseeva

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

ABSTRACT

Introduction. Many materials are subject to flameless, smoldering combustion: coal, cotton, peat, carbonizing polymers, etc. The fire hazard of smoldering burning of organic materials is that low-calorie ignition sources are sufficient to initiate the combustion process, the process is hidden, making it difficult to detect, and can spontaneously turn into a fiery one.

Purpose and objectives. The purpose of this work was to determine the macrokinetics of pyrolysis and thermo-oxidative decomposition of wood of different types of conifers and deciduous species by thermal analysis.

Methods. Samples were investigated by thermal analysis in an inert and air environment. For this, we used the automated modular system Du Pont-9900, including the TGA-951 thermobalance, and the DSK-910 differential scanning calorimeter.

Results. It was found that the pyrolysis of the main components of wood (hemicellulose and cellulose) proceeds according to the nucleation and growth mechanism of nuclei according to the case law R ($n = 1$) with activation energies close in order of magnitude for different species (98–136 kJ/mol for hemicelluloses and 203–233 kJ/mol for cellulose). At the stages of thermooxidative decomposition of wood components and heterogeneous oxidation of the carbonized product, diffusion of the D3 (D4) type in spherical geometry becomes the mechanism controlling the process. The effective activation energy of the decomposition of hemicelluloses is reduced to 90.9–95.8 kJ/mol, and of cellulose to 138.3–160.9 kJ/mol. The reaction of heterogeneous oxidation of carbonized products makes a significant contribution to the flameless, smoldering combustion of the material. It is diffusion-controlled and is characterized by high values of activation energy (up to 285 kJ/mol).

Conclusion. The results of the work make it possible to evaluate the macrokinetic parameters of pyrolysis and thermooxidative decomposition of wood of different species during flameless combustion. The obtained data can be used as the main parameters for modeling the heterogeneous combustion of wood of different species in buildings.

Keywords: smoldering combustion; thermal behavior; macrokinetic parameters; wood pyrolysis; thermogravimetric analysis.

Acknowledgements: The authors are grateful to Yuriy K. Naganovskiy for help in conducting thermal analysis experiments.

For citation: E. Yu. Kruglov, R. M. Aseeva. Flameless burning of wood: parameters of macrokinetics of pyrolysis and thermo-oxidative decomposition. *Pozharovzryvbezopasnost/Fire and Explosion Safety*, 2020, vol. 29, no. 1, pp. 43–54 (in Russian). DOI: 10.18322/PVB.2020.29.01.43-54.

✉ Evgeniy Yuryevich Kruglov, e-mail: 89268196698@mail.ru

Введение

Беспламенное горение является одним из типов физико-химического процесса горения материальной субстанции. В его основе лежат самоускоряющиеся, самораспространяющиеся гетерогенные экзотермические реакции, которые протекают на межфазной поверхности твердых веществ [1]. Этот тип горения часто встречается в природе и широко используется в технологии получения разной ценной продукции [2–5]. Он может очень значительно различаться по условиям реализации, исходным веществам и материалам, своим характеристикам: от медленного низкотемпературного горения пористых органических сред (тлеющее горение — smoldering) до экстремально быстрого высокотемпературного процесса “твердопламенного горения” неорганических веществ (самораспространяющийся высокотемпературный синтез (СВС) [4, 5]). Пожарную опасность представляют самопроизвольные, неконтролируемые процессы горения.

Не только древесина, но и многие другие материалы подвержены беспламенному, тлеющему горению. Это уголь, хлопок, бумага, торф, растительная биомасса, опилки, карбонизирующиеся полимеры и пр. Пожарная опасность тлеющего горения органических материалов состоит в том, что для инициирования процесса горения достаточно наличие низкокалорийных источников зажигания, процесс носит скрытый характер, что затрудняет его обнаружение, и может самопроизвольно перейти в пламенный. При этом сама реакция тления служит источником как газообразного топлива, так и локального импульса его поджига, инициируя новые пожары. Тлеющее

горение сопровождается образованием значительного количества дыма и токсичных газов, которые загрязняют окружающую среду и создают угрозу для всего живого [6–8].

По сообщению ТАСС РФ, только в июле — августе 2010 г. из-за аномально высокой температуры во многих регионах страны было зафиксировано 34,8 тысяч очагов тления торфяных и инициированных ими лесных пожаров общей площадью около 2 млн. га. От смога и пожаров пострадали 17 регионов страны, более 2,3 тысяч семей остались без крова, более 60 чел. погибли в огне и от отравления продуктами горения, ущерб был оценен в 85,5 млрд. руб. [9]. К сожалению, в РФ (в отличие, например, от США) отсутствует системная регистрация статистики пожаров, инициированных источниками тлеющего горения.

Баланс между скоростью тепловыделения за счет гетерогенной реакции древесины с кислородом воздуха и скоростью тепловых потерь из зоны реакции определяет режим тлеющего горения. Древесина представляет собой природный композиционный материал. По сравнению с другими пористыми материалами она обладает относительно высокой объемной плотностью, более низкой пористостью и проницаемостью для кислорода воздуха, анизотропностью свойств. Это обстоятельство сказывается на характеристиках тлеющего горения древесины. Анализ пожаров, связанных с воспламенением деревянных конструкций, через которые проходили трубы горячего водяного или парового отопления, выявил самую низкую пороговую температуру 77 °C [10]. Эта температура соответствует началу обугли-

вания древесины вследствие многолетнего контакта ее с горячими трубами и ограниченного доступа кислорода воздуха, а также инициированию тлеющего горения древесины [10]. Инициирование тлеющего горения других пористых материалов требует в несколько раз меньшего по величине внешнего теплового потока, чем инициирование пламенного горения. Так, при контактном нагреве критическая плотность теплового потока для инициирования тлеющего горения вспененного полиуретана составляет 2 кВт/м², а пламенного — 8 кВт/м² [11, 12].

Пиролиз и термоокислительное разложение древесины, приводящие к образованию кокса, его последующая реакция с кислородом воздуха являются важными составляющими процесса тлеющего горения древесины. Для моделирования процесса тления и предсказания скорости его распространения, условий затухания или перехода в пламенное горение необходимо знать количественные макрокинетические параметры указанных выше реакций.

Цель настоящей работы состояла в определении параметров макрокинетики пиролиза и термоокислительного разложения древесины разных видов хвойных и лиственных пород методами термического анализа. Большое внимание уделено выявлению различий в термическом поведении карбонизованных остатков, образующихся в разных условиях нагрева древесины, в том числе при стандартном режиме пожара.

Материалы и методы исследования

Объектом исследования были образцы древесины двух видов хвойной (ель, сосна) и двух разновидностей лиственной (береза, дуб) пород из средней полосы России, часто применяемых в строительстве каркасных деревянных зданий и сооружений в качестве конструктивных и отделочных материалов. Для термического анализа [13] образцов в инертной и воздушной средах использовали автоматизированную модульную систему Du Pont-9900, включающую термовесы ТГА-951, дифференциально-сканирующий калориметр ДСК-910 и компьютер со специальным программным обеспечением. Масса образцов составляла 3,5–8,0 мг, расход воздуха или азота — 50 мл/мин, скорость нагрева — 5; 10 и 20 °С/мин. В динамическом режиме ТГ-испытания проводили сначала в инертной атмосфере до 750 °С, а далее в среде воздуха — до 850 °С. ДСК-кривые в азоте получены при скорости нагрева 10 °С/мин. Для термического анализа использовали также образцы кокса, образующегося на поверхности древесины сосны при одностороннем нагреве в поперечном к ориентации волокон направлении в условиях стандартного режима пожара. Огневые испытания были проведены в лабораторной установке “Огневая

печь” (на кафедре пожарной безопасности в строительстве Академии ГПС МЧС России).

Теоретические основы

При расчете эффективных кинетических параметров пиролиза и окислительного разложения образцов древесины выявленные стадии деструкции индивидуальных компонентов считали самостоятельными частями общих кривых со степенью превращения α от 0 до 1. Каждая стадия деструкции подчиняется температурной зависимости по закону Аррениуса:

$$\frac{d\alpha}{dT} = \frac{A}{\beta} \exp\left(-\frac{E}{RT}\right) f(\alpha), \quad (1)$$

где α — степень превращения;

T — температура, К;

A — предэкспоненциальный множитель;

β — скорость нагрева, °С/мин;

E — энергия активации;

R — универсальная газовая постоянная,

Дж/(моль·К);

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

$$\alpha = \frac{m_0 - m_t}{m_0 - m_k}; \quad (2)$$

m_0 , m_t , m_k — масса вещества соответственно в начальный, текущий и конечный моменты времени на рассматриваемой стадии разложения.

Разделение переменных и интегрирование уравнения (1) дают возможность применить интегрированную функцию степени превращения $g(\alpha)$ для расчета кинетических параметров разложения древесины. В данном случае было использовано уравнение с аппроксимацией решения интеграла температурной зависимости по Горбачеву как наиболее точное [14]:

$$g(\alpha) = \left\{ A \frac{RT^2}{\beta} (E + 2RT) \right\} \exp\left(-\frac{E}{RT}\right). \quad (3)$$

Функцию $g(\alpha)$, характеризующую механизм разложения вещества, оценивали по методу Criado [15] по табулированным значениям приведенной скорости разложения V , т. е. отнесенной к скорости полураспада вещества $\alpha = 0,5$:

$$V = \left(\frac{T}{T_{0,5}} \right)^2 \frac{d\alpha/dt}{(d\alpha/dt)_{0,5}}, \quad (4)$$

а также по степени превращения, соответствующей максимальной скорости разложения $\alpha_{\max}$ [16].

Так как величина $(T/T_{0,5})^2$ близка к 1, приведенную скорость V легко определить по соотношению расстояний соответствующих точек на ДТГ-кривой от базовой линии. В работе [14] даны табулирован-

ные значения $\alpha_{\max}$ и приведенных скоростей разложения V при $\alpha = 0,75$ и $\alpha = 0,8$, которые присущи разным механизмам процесса разложения вещества.

Процедура определения параметров макрокинетики разложения образцов древесины в разных средах включала три этапа. На первом этапе ТГ- и ДТГ-кривые, полученные при одной из скоростей нагрева, использовали в целях установления механизма процесса разложения и определения функции $g(\alpha)$. Поэтому экспериментально найденные значения $\alpha_{\max}$ и V при $\alpha = 0,75$ для основных стадий разложения древесины сравнивали с табулированными. Построение анаморфоз в координатах $\lg[g(\alpha)/T^2] - 1/T$ по кривым, полученным при одной скорости нагрева, позволяет определить макрокинетические параметры исследуемого образца. Однако для получения надежной реалистичной картины процесса разложения объекта необходим анализ его термического поведения при разных скоростях нагрева. Подобный подход был использован нами при определении кинетических параметров термоокисления пенополимеров карбонизирующего типа [16–19].

На втором этапе определяли эффективную энергию активации по так называемому методу мультиплетной скорости нагрева по Киссинджеру [20] в координатах $\ln(\beta/T_{\max}^2) - 1/T_{\max}$ (здесь $T_{\max}$ — температура, соответствующая максимальной скорости разложения конкретно рассматриваемой стадии).

На третьем этапе рассчитывали предэкспоненциальный множитель, зная функцию $g(\alpha)$ и ее значение при $\alpha_{\max}$. В частности, из уравнения (3) следует:

$$\lg A = \lg \frac{g(\alpha)}{T_{\max}^2} + \lg \beta \frac{E + 2RT_{\max}}{R} + \frac{E}{RT_{\max}} \lg e. \quad (5)$$

Результаты и их обсуждение

На рис. 1 приведены для сравнения ТГ- и ДТГ-кривые разложения образцов древесины при их нагреве в азоте со скоростью 20 °С/мин до 500 °С (участок, связанный с испарением воды, на графике не показан). У лиственных образцов древесины на кривых ДТГ очень четко выражена низкотемпературная область в виде плеча или не полностью проявленного пика. У образцов же древесины хвойных пород в этой области заметны лишь перегибы при немного более высокой температуре. Такой характер кривых ДТГ обусловлен тем, что температурные интервалы разложения компонентов древесины — гемицеллюлоз и целлюлозы в той или иной степени перекрывают друг друга. Основные ДТГ пики связаны с разложением целлюлозы. В температурной области выше 400 °С разложение идет почти с постоянной скоростью и, как считают некоторые исследователи [21], связано с участием лигнина в обугливание древесины. Для уточнения характера про-

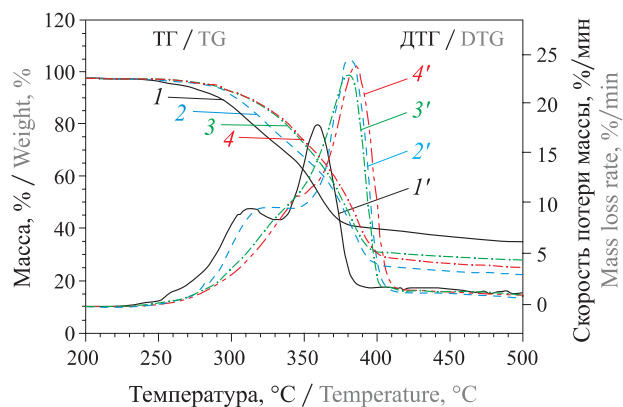


Рис. 1. Сравнение ТГ (1, 2, 3, 4) и ДТГ (1', 2', 3', 4') кривых пиролиза образцов древесины разных видов при скорости нагрева 20 °С/мин: 1, 1' — дуб; 2, 2' — береза; 3, 3' — ель; 4, 4' — сосна

Fig. 1. Comparison of the TG (1, 2, 3, 4) and DTG (1', 2', 3', 4') curves of the pyrolysis of wood samples of different types at a heating rate of 20 °C/min: 1, 1' — oak; 2, 2' — birch tree; 3, 3' — spruce; 4, 4' — pine

цесса разложения древесины целесообразно провести анализ вторых производных скорости потери массы, а также применить метод симметричных гауссиан для выделения температурных зон разложения компонентов древесины [22]. Используя реперные температурные точки, соответствующие зонам разложения компонентов древесины, можно оценить примерный химический состав испытуемого образца древесины.

Например, образец дуба, на ДТГ-кривых которого особенно хорошо проявляется плечо скорости разложения гемицеллюлоз (рис. 2), содержит около 7 % экстрактивных веществ, 60 % холоцеллюлозы, в том числе до 14 % гемицеллюлоз, и 25 % лигнина

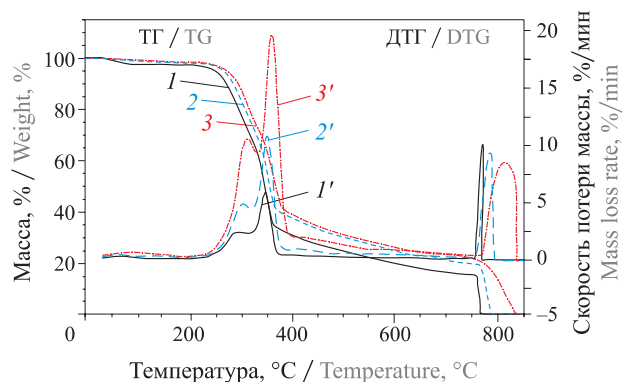


Рис. 2. ТГ (1, 2, 3) и ДТГ (1', 2', 3') кривые пиролиза древесины дуба при нагреве со скоростью 5 °С/мин (1, 1'), 10 °С/мин (2, 2'), 20 °С/мин (3, 3') в азоте до 750 °С и затем в среде воздуха до 850 °С

Fig. 2. TG (1, 2, 3) and DTG (1', 2', 3') curves of pyrolysis of oak wood when heated at speeds 5 °C/min (1, 1'), 10 °C/min (2, 2'), 20 °C/min (3, 3') in nitrogen up to 750 °C and then in air up to 850 °C

(по разности). Каждый компонент вносит разный вклад в образование карбонизованного остатка. Наибольший вклад принадлежит лигнину, содержащему в своей молекулярной структуре ароматические ядра и ненасыщенные группы [23].

Смена атмосферы при термическом анализе образцов древесины дает возможность определить макрокинетические параметры окисления образующихся при пиролизе карбонизованных продуктов.

В окислительной среде разложение образцов древесины начинается при более низкой температуре. При этом у образцов лиственных пород остается хорошо выраженным “плечо” гемицеллюлоз на кривых ДТГ (рис. 3). При нагревании выше 400 °C наблюдается пик, связанный с активным окислением кокса.

У образцов хвойных видов древесины перегибы на ДТГ-кривых становятся менее выраженными (рис. 4). Возрастает соотношение интенсивностей пиков окисления кокса и первичного разложения древесины. Это указывает на усиление окислитель-

ного направления реакций разложения древесины хвойных пород.

В табл. 1 и 2 приведены результаты определения макрокинетических параметров пиролиза и термоокислительной деструкции (ТОД) образцов древесины.

Химический состав разных пород древесины сказывается на их термическом поведении. Известно, что экстрактивные составляющие представляют собой сложную смесь в основном низкомолекулярных органических соединений различных классов. В зависимости от породы и разновидности древесины, региона произрастания растений количество этих веществ может сильно меняться [24]. Они могут не только улетучиваться в результате испарения, но и подвергаться деструкции, катализировать или ингибировать реакции других составляющих древесины. В испытуемых в настоящей работе образцах древесины содержание экстрактивных веществ относительно невелико, поэтому главное внимание

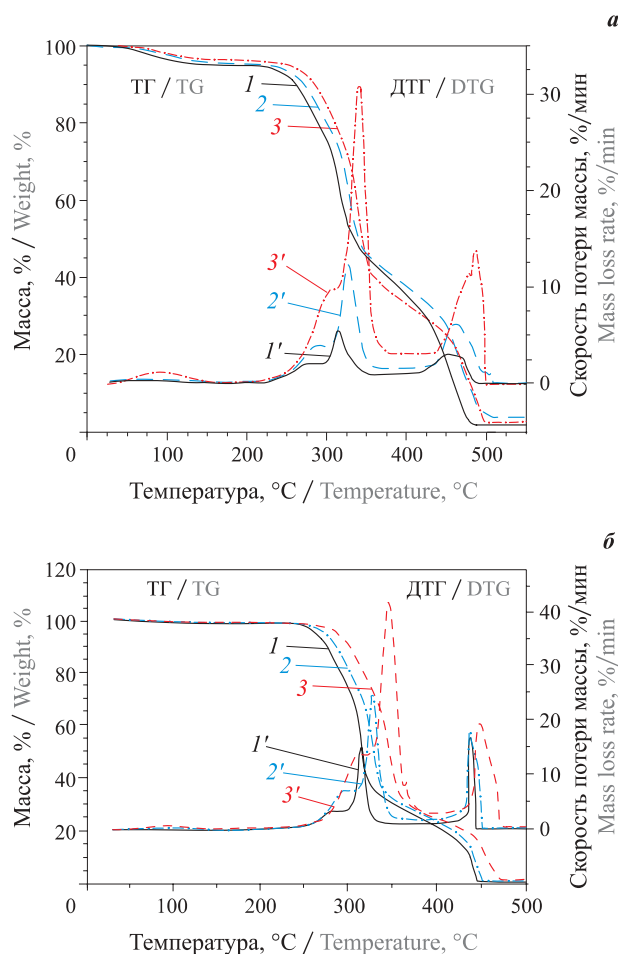


Рис. 3. ТГ (1, 2, 3) и ДТГ (1', 2', 3') кривые разложения древесины дуба (а) и березы (б) при нагреве на воздухе со скоростью 5 °C/мин (1, 1'); 10 °C/мин (2, 2') и 20 °C/мин (3, 3')

Fig. 3. TG (1, 2, 3) and DTG (1', 2', 3') decomposition curves of oak (a) and birch (b) wood when heated in air at a speed of 5 °C/min (1, 1'); 10 °C/min (2, 2') and 20 °C/min (3, 3')

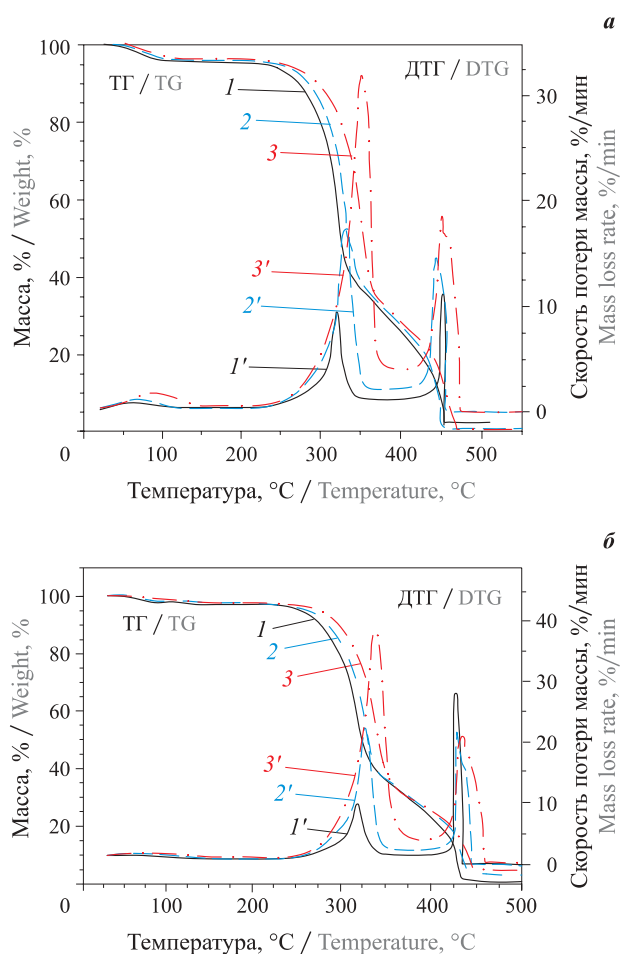


Рис. 4. ТГ (1, 2, 3) и ДТГ (1', 2', 3') кривые разложения древесины сосны (а) и ели (б) при нагреве на воздухе со скоростью 5 °C/мин (1, 1'), 10 °C/мин (2, 2') и 20 °C/мин (3, 3')

Fig. 4. TG (1, 2, 3) and DTG (1', 2', 3') decomposition curves of pine (a) and spruce (b) wood when heated in air at a speed of 5 °C/min (1, 1'), 10 °C/min (2, 2') and 20 °C/min (3, 3')

Таблица 1. Температурные показатели и макрокинетические параметры пиролиза древесины разных видов
Table 1. Temperature indicators and macrokinetic parameters of different types of wood pyrolysis

Показатель / Index	Сосна Pine	Ель Spruce	Береза Birch tree	Дуб Oak
Плотность, кг/м ³ / Density, kg/m ³	462	395	573	629
Температура начала пиролиза T_n , °C / Pyrolysis start temperature T_{pyr} , °C	170	165	165	160
Максимальная температура разложения гемицеллюлозы $T_{\max \text{ гц}}$, °C Maximum decomposition temperature of hemicellulose $T_{\max \text{ hem}}$, °C	350	347	323	313
Максимальная температура разложения целлюлозы $T_{\max \text{ цел}}$, °C Maximum cellulose decomposition temperature $T_{\max \text{ cel}}$, °C	389	385	376	363
Коксовый остаток*, % / Coke residue*, %	23,0	25,0	20,0	32,0
Энергия активации реакции разложения гемицеллюлозы $E_{\text{гц}}$, кДж/моль Activation energy of the decomposition of hemicellulose E_{hem} , kJ/mol	101,8	98,2	136,6	105,8
Предэкспоненциальный множитель реакции разложения гемицеллюлозы $\lg A_{\text{гц}}$, мин ⁻¹ Preexponential factor for the decomposition reaction of hemicellulose $\lg A_{\text{hem}}$, min ⁻¹	8,202	7,028	11,923	8,570
Механизм пиролиза гемицеллюлозы / Pyrolysis mechanism of hemicellulose	R(1)	D4	R(1)	R(1)
Энергия активации реакции разложения целлюлозы $E_{\text{цел}}$, кДж/моль Activation energy of the decomposition of cellulose E_{cel} , kJ/mol	220,8	203,0	214,3	233,0
Предэкспоненциальный множитель реакции разложения целлюлозы $\lg A_{\text{цел}}$, мин ⁻¹ The preexponential factor for the decomposition reaction of cellulose $\lg A_{\text{cel}}$, min ⁻¹	17,8185	17,51	16,596	19,325
Механизм пиролиза целлюлозы / Pyrolysis mechanism cellulose	R(1)	R(1)	R(1)	R(1)
Теплота реакции пиролиза $\Delta H_{\text{пир}}$, Дж/г* / Heat of the reaction of pyrolysis ΔH_{pyr} , J/g*	111,9	—	112,5	81,98

* При 500 °C при нагреве со скоростью 20 °C/мин. / At 500 °C at a heating rate of 20 °C/min.

уделено разложению основных компонентов. Однако обращает на себя внимание заметное снижение температуры $T_{\max \text{ гц}}$ у образца дуба, содержание экстрактивных веществ в составе которого самое высокое (7 %). Можно сказать, что в целом полученные значения энергии активации пиролиза гемицеллюлоз древесины разных видов, так же как и целлюлозы, согласуются с установленными ранее другими исследователями [21]. Процесс пиролиза олигомерных и высокомолекулярных полисахаридов (гемицеллюлоз и целлюлозы) хвойных и лиственных разновидностей древесины (за исключением ели) протекает по механизму нуклеации и росту образовавшихся ядер (центров деструкции макромолекул) по закону случая R ($n = 1$), или R(1). Этот механизм описывается уравнением интегрированной функции [14]:

$$g(\alpha) = [-\ln(1 - \alpha)]^{n=1}.$$

Пиролиз гемицеллюлоз ели, как показывает анализ данных табл. 1, протекает по механизму D4, контролируемому диффузией, и описывается уравнением

$$g(\alpha) = \left(1 - \frac{2\alpha}{3}\right) - (1 - \alpha)^{2/3}.$$

Можно полагать, что полученный для ели результат связан с вкладом экстрактивных веществ в общую потерю массы на рассматриваемой стадии,

так как их температурная зона разложения частично перекрывается зоной гемицеллюлозы.

Сравнение рис. 2 и 3,а наглядно показывает, что кислород воздуха инициирует разложение древесины, а макромолекулы полисахаридов (целлюлозы и гемицеллюлозы) являются наиболее чувствительными компонентами. Максимальная скорость потери массы целлюлозы дуба при нагреве со скоростью 20 °C/мин на воздухе возрастает в 1,8 раза по сравнению с инертной средой, а целлюлозы березы — в 1,6 раза (см. рис. 1 и 3,б). Разница в скорости потери массы, наблюдаемая при термоокислении целлюлозы дуба и березы, скорее всего связана с разной кристалличностью целлюлозы [25]. В меньшей степени в этих условиях растет скорость потери массы гемицеллюлоз. Подтверждением вывода о чувствительности основных компонентов древесины к инициированию разложения кислородом воздуха является снижение значений их макрокинетических параметров и изменение механизма процесса разложения (см. табл. 2). Механизмом, контролирующим разложение основных компонентов образцов древесины на воздухе, становится диффузия кислорода к реагирующей поверхности (или летучих продуктов деструкции) по закону D3 (или D4) в сферической геометрии. Интегрированная функция степени пре-

Таблица 2. Температурные показатели и макрокинетические параметры термоокислительной деструкции древесины разных видов
Table 2. Temperature indicators and macrokinetic parameters of thermooxidative destruction of wood of different types

Показатель / Index	Сосна Pine	Ель Spruce	Береза Birch tree	Дуб Oak
Интервал исследования ΔT_1 , °C Interval of the initial half-peak ΔT_1 , °C	167–395	140–390	145–390	150–400
Максимальная температура плеча $T_{\max, \text{пл}}$, °C Maximum shoulder temperature (half peak) $T_{\max, \text{sh}}$, °C	–	–	319	333
Максимальная температура первого пика $T_{\max 1}$, °C Maximum temperature of first peak $T_{\max 1}$, °C	347	338	350	341
$E_{\text{гц}}$, кДж/моль / E_{hem} , kJ/mol	–	–	95,83	90,93
$\lg A_{\text{гц}}$, мин ^{–1} / $\lg A_{\text{hem}}$, min ^{–1}	–	–	8,314	6,645
Механизм — плечо / Mechanism — shoulder	–	–	R(1)	D4
Энергия активации первого пика E_1 , кДж/моль Activation energy of the first peak E_1 , kJ/mol	149,04	160,9	138,3	150,0
Предэкспоненциальный множитель первого пика $\lg A_1$, мин ^{–1} Preexponential factor of the first peak $\lg A_1$, min ^{–1}	12,5248	12,884	10,7665	11,8044
Механизм ТОД / TOD mechanism	D3	D3	D3	D3
Анализируемый интервал для второго пика ΔT_2 , °C Analyzed interval for the second peak ΔT_2 , °C	400–500	390–470	390–480	400–550
Максимальная температура второго пика $T_{\max 2}$, °C Maximum temperature of the second peak $T_{\max 2}$, °C	445	439	446	461
Энергия активации второго пика E_2 , кДж/моль Activation energy of the second peak E_2 , kJ/mol	191,6	282,6	281	276,5
Предэкспоненциальный множитель второго пика $\lg A_2$, мин ^{–1} Preexponential factor of the second peak $\lg A_2$, min ^{–1}	12,651	19,618	19,533	18,489
Механизм ТОД кокса / The mechanism of TOD of coke	D3	D3	D3	D3
Теплота термоокислительной деструкции $\Delta H_{\text{ТОД}}$, Дж/г Heat of thermal oxidative degradation ΔH_{TOD} , J/g	4867	–	5850	6381

вращения по механизму D3 подчиняется уравнению [14]:

$$g(\alpha) = [1 - (1 - \alpha)^{1/3}]^2.$$

Кислород способствует низкотемпературной карбонизации полисахаридов, препятствуя деполимеризации макромолекул за счет реакций межцепного взаимодействия и образования пространственно-сетчатой структуры, усиления реакций разложения в направлении интрамолекулярной дегидратации. Это известное явление широко используется в технологии производства углеродных волокнистых материалов из целлюлозного сырья [24].

Вторая стадия термоокислительного разложения образцов древесины (см. рис. 3 и 4) связана с гетерогенным окислением образовавшегося карбонизованного продукта. Она протекает с высокими значениями энергии активации по диффузионному механизму D3 независимо от разновидности древесины (см. табл. 2). Именно эта экзотермическая реакция вносит большой вклад в возникновение и особенности протекания процесса тления. Представлялось важным сравнить, как изменяются кинетические па-

раметры разложения карбонизованных продуктов, образующихся после стадий пиролиза и термоокислительной деструкции древесины, при нагреве с постоянной скоростью в условиях ТГА. Понятно, что степень обогащения углеродом исследуемых образцов коксов неодинакова, так как они образуются при разных температурах (свыше 750 °C и свыше 400 °C) в различных средах. Следовательно, можно ожидать значительной разницы в термическом поведении и величине кинетических параметров этих продуктов. В табл. 3 приведены результаты расчета параметров окисления коксов после пиролиза древесины.

У всех пород древесины сохраняется контролируемый механизм диффузионного разложения коксов D3 и высокие значения энергии активации. На характер изменения параметров окисления коксов (по сравнению с данными табл. 2) влияет разновидность древесины. В целом древесные коксы, полученные в инертной среде, более устойчивы к высокотемпературному окислению. Максимальная скорость потери массы снижается в 2–3 раза. Структура и свойства коксов, образующихся при пиролизе

Таблица 3. Макрокинетические параметры окисления угольных остатков древесины после пиролиза и действия стандартного режима пожара / **Table 3.** Macrokinetic parameters of oxidation of coal wood residues after pyrolysis and the action of a standard fire

Показатель / Index	Сосна Pine	Ель Spruce	Береза Birch tree	Дуб Oak
Интервал ΔT (ТГА), °C / Interval ΔT (TGA), °C	750–820	750–840	750–835	750–835
$T_{\max}$, °C	781	775	784	780
E , кДж/моль / E , kJ/mol	259,7	272,1	269,4	285,6
$\lg A$, мин ⁻¹ / $\lg A$, min ⁻¹	11,389	12,105	11,845	12,726
Механизм разложения коксов / Coke decomposition mechanism	D3	D3	D3	D3



Рис. 5. Вид обугленного слоя древесины сосны после воздействия стандартного режима пожара

Fig. 5. View of the charred layer of pine wood after exposure to standard fire

древесины, существенно зависят от ее породы и вида и, соответственно, от исходной плотности образцов. Древесина хвойных пород (сосна и ель) обугливается быстрее, чем лиственных, и образует при этом менее плотный, высокопористый, быстро прогорающий угольный слой. Этот вывод подтверждает сравнение коксов ели и дуба, полное выгорание которых при высокой температуре происходит соответственно за 2,5 и 3,1 мин.

Следует подчеркнуть, что в условиях ТГА в микробразцах фактически отсутствует температурный градиент и режим процесса деструкции близок к реально отражающему кинетику реакций. Это дает возможность применить полученные этим методом макрокинетические параметры разложения древесины для последующего моделирования процессов горения массивных образцов с дополнительным учетом параметров тепло- и массопереноса.

Хорошо известно, что на характер и динамику обугливания древесины при пожаре влияют условия горения. На рис. 5 показан вид обугленного слоя древесины сосны при воздействии стандартного режима пожара в течение 24 мин.

Средняя объемная плотность кокса, толщина которого достигла за этот период теста 21 мм, была равна 192 кг/м³. Пористость кокса увеличилась по сравнению с исходной древесиной в 1,3 раза (с 69,6 до 90 %). На рис. 5 невооруженным глазом видно сохранение морфологической фибриллярной струк-

туры исходной древесины, наличие обуглероженных волокон целлюлозы в матрице аморфного углерода.

На рис. 6 представлены результаты термического анализа (ТГ-, ДТГ- и ДСК-кривые) двух образцов, взятых с поверхности обугленного слоя, непосредственно подвергнувшегося действию огня, и слоя на глубине 20 мм.

Сравнительный анализ кривых, имеющих сложный характер, подтверждает неоднородную структуру по толщине образующегося обуглероженного слоя. На обогреваемой поверхности этот слой больше обогащен углеродом, и так как он более термостоек, его ДСК показывает большее тепловыделение. Кокс на глубине 20 мм при очень малой потере массы до 300 °C уже при нагреве выше 200 °C обнаруживает заметное тепловыделение. Можно предположить, что этот экзоэффект обусловлен тем, что в порах кокса вблизи фронта пиролиза древесины удерживается какое-то количество продуктов деструкции с высокой температурой кипения (часто обозначаемых как tar — смола). Представляется целесообразным дальнейшее детальное изучение скорости обугливания образцов древесины по толщине в разных условиях огневого воздействия, а также оценка свойств неоднородной структуры обугленных слоев.

Заключение

Проведено тщательное исследование термического поведения образцов древесины хвойной (сосна, ель) и лиственной (береза, дуб) пород в разных средах (азот, воздух) и при различных условиях теплового воздействия. Для определения макрокинетических параметров, а также механизма пиролиза и термоокислительного разложения древесины использовались методы термического анализа (ТГ, ДТГ и ДСК).

Древесина представляет собой природный композиционный материал, химический состав которого влияет на температурные характеристики и кинетику разложения древесины. Установлено, что пиролиз основных компонентов древесины (гемичеселлюлозы и целлюлозы) протекает по механизму

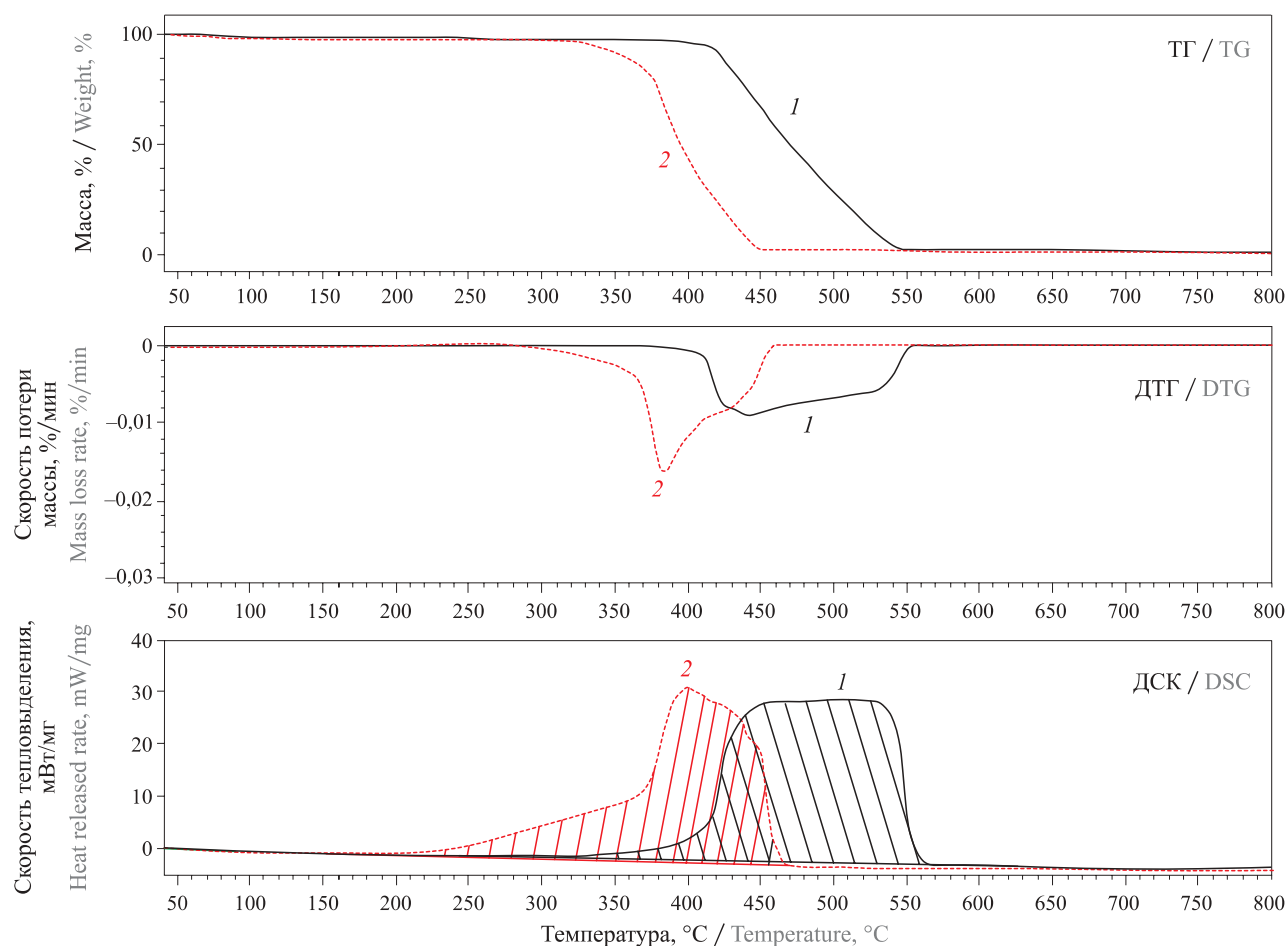


Рис. 6. ТГ-, ДТГ- и ДСК-кривые образцов кокса после огневого воздействия при скорости нагрева на воздухе 20 °С/мин: 1 — на обогреваемой поверхности; 2 — на глубине 20 мм

Fig. 6. TG, DTG and DSC curves of coke samples after fire exposure: 1 — on a heated surface; 2 — at a depth of 20 mm. The heating rate in air is 20 °C/min

нуклеации и росту ядер по закону случая R ($n = 1$) с энергиями активации, близкими по порядку величины для разных пород (98–136 кДж/моль — для гемицеллюлоз и 203–233 кДж/моль — для целлюлозы). Кислород воздуха инициирует и ускоряет разложение, способствуя карбонизации древесины и изменяя механизм процесса. На стадиях термоокислительного разложения компонентов древесины и гетерогенного окисления карбонизованного продукта механизмом, контролирующим процесс, становится диффузия типа D3 (D4) в сферической геометрии. Эффективная энергия активации разложения гемицеллюлоз снижается до 90,9–95,8 кДж/моль, а целлюлозы — до 138,3–160,9 кДж/моль. Экзо-

термическая реакция гетерогенного окисления карбонизованных продуктов разложения древесины вносит существенный вклад в беспламенное, тлеющее горение материала. Она является диффузионно контролируемой, характеризуется высокими значениями энергии активации (до 285 кДж/моль), которые зависят от разновидности исходной древесины и степени обуглероживания коксов. При действии стандартного режима пожара на образец сосны в поперечном к ориентации волокон направлении выявлено сохранение фибриллярной морфологии исходной древесины и неоднородность структуры высокопористого кокса, подтвержденная термическим анализом.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Франк-Каменецкий Д. А. Диффузия и теплопередача в химической кинетике. — 2-е изд. — М.: Наука, 1967. — 484 с.
2. Rein G. Smoldering combustion // SFPE Handbook of Fire Protection Engineering / Hurley M. J. (editor-in-chief). — 5th ed. — New York, NY: Springer, 2016. — P. 581–603. DOI: 10.1007/978-1-4939-2565-0_19.

3. *Rabelo E. R. C., Veras C. A. G., Carvalho J. A., Alvarado E. C., Sandberg D. V., Santos J. C.* Log smoldering after an Amazonian deforestation fire // *Atmospheric Environment*. — 2004. — Vol. 38, Issue 2. — P. 203–211. DOI: 10.1016/j.atmosenv.2003.09.065.
4. *Мержанов А. Г., Сычев А. Е.* О самораспространяющемся высокотемпературном синтезе (СВС). URL: http://www.ism.ac.ru/handbook/_shsr.htm (дата обращения: 20.12.2019).
5. *Мержанов А. Г., Мукасян А. С.* Твердопламенное горение. — 2-е изд. — М.: Торус Пресс, 2007. — 336 с.
6. *Davies G. M., Gray A., Rein G., Legg C. J.* Peat consumption and carbon loss due to smouldering wild-fire in a temperate peatland // *Forest Ecology and Management*. — 2013. — Vol. 308. — P. 169–177. DOI: 10.1016/j.foreco.2013.07.051.
7. *Hadden R. M., Rein G., Belcher C. M.* Study of the competing chemical reactions in the initiation and spread of smouldering combustion in peat // *Proceedings of the Combustion Institute*. — 2013. — Vol. 34, Issue 2. — P. 2547–2553. DOI: 10.1016/j.proci.2012.05.060.
8. *Rein G.* Smouldering fires and natural fuels // *Fire phenomena in the earth system — an interdisciplinary guide to fire science* / Belcher C. M. (ed.). — Chichester: John Wiley & Sons, 2013. — P. 15–33. DOI: 10.1002/9781118529539.ch2.
9. Торфяные пожары в России в 2009–2014 годах / ТАСС. URL: <https://tass.ru/info/1352655> (дата обращения: 20.12.2019).
10. *Babrauskas V.* Pyrophoric carbon and long-term, low temperature ignition of wood // *Fire and Arson Investigator*. — 2001. — Vol. 52, No. 2. — P. 12–14.
11. *Walther D. C., Fernandez-Pello A. C., Urban D. L.* Space shuttle based microgravity smoldering combustion experiments // *Combustion and Flame*. — 1999. — Vol. 116, Issue 3. — P. 398–414. DOI: 10.1016/s0010-2180(98)00095-9.
12. *Hadden R., Alkatib A., Rein G., Torero J. L.* Radiant ignition of polyurethane foam: the effect of sample size // *Fire Technology*. — 2014. — Vol. 50, Issue 3. — P. 673–691. DOI: 10.1007/s10694-012-0257-x.
13. *Шестак Я.* Теория термического анализа: физико-химические свойства твердых неорганических веществ / Пер. с англ. — М.: Мир, 1987. — 456 с.
14. *Rogers F. E., Ohlemiller T. J.* Pyrolysis kinetics of a polyurethane foam by thermogravimetry. A general kinetic method // *Journal of Macromolecular Science: Part A — Chemistry*. — 1981. — Vol. 15, No. 1. — P. 169–185. DOI: 10.1080/00222338108066438.
15. *Criado J. M.* Kinetic analysis of DTG from master curves // *Thermochimica Acta*. — 1978. — Vol. 24, Issue 1. — P. 186–189. DOI: 10.1016/0040-6031(78)85151-x.
16. *Кобелев А. А., Круглов Е. Ю., Асеева Р. М., Серков Б. Б., Шутов Ф. А.* Термическое поведение полимерной теплоизоляции пониженной горючести // *Пожаровзрывобезопасность/Fire and Explosion Safety*. — 2018. — Т. 27, № 4. — С. 13–23. DOI: 10.18322/PVB.2018.27.04.13-23.
17. *Круглов Е. Ю., Кобелев А. А., Шутов Ф. А., Асеева Р. М.* Термогравиметрический анализ разложения полимерного пенокомпозиата PENOCOM // *Все материалы. Энциклопедический справочник*. — 2016. — № 6. — С. 30–34.
18. *Кобелев А. А., Круглов Е. Ю., Серков Б. Б., Асеева Р. М.* Закономерности термоокислительной деструкции полистирольной теплоизоляции пониженной горючести // *Пожары и чрезвычайные ситуации: предотвращение, ликвидация*. — 2018. — № 2. — С. 74–80. DOI: 10.25257/FE.2018.2.74-80.
19. *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.
20. *Kissinger H. E.* Reaction kinetics in differential thermal analysis // *Analytical Chemistry*. — 1957. — Vol. 29, No. 11. — P. 1702–1706. DOI: 10.1021/ac60131a045.
21. *Grønli M. G., Várhegyi G., Di Blasi C.* Thermogravimetric analysis and devolatilization kinetics of wood // *Industrial & Engineering Chemistry Research*. — 2002. — Vol. 41, Issue 17. — P. 4201–4208. DOI: 10.1021/ie0201157.
22. *Branca C., Albano A., Di Blasi C.* Critical evaluation of global mechanisms of wood devolatilization // *Thermochimica Acta*. — 2005. — Vol. 429, Issue 2. — P. 133–141. DOI: 10.1016/j.tca.2005.02.030.
23. *Miller R. S., Bellan J.* A generalized biomass pyrolysis model based on superimposed cellulose, hemicellulose and lignin kinetics // *Combustion Science and Technology*. — 1997. — Vol. 126, Issue 1-6. — P. 97–137. DOI: 10.1080/00102209708935670.
24. *Асеева Р. М., Серков Б. Б., Сивенков А. Б.* Горение древесины и ее пожароопасные свойства. — М.: Академия ГПС МЧС России, 2010. — 262 с.

25. Poletto M., Zattera A. J., Forte M. M. C., Santana R. M. C. Thermal decomposition of wood: Influence of wood components and cellulose crystallite size // *Bioresource Technology*. — 2012. — Vol. 109. — P. 148–153. DOI: 10.1016/j.biortech.2011.11.122.

REFERENCES

1. D. A. Frank-Kamenetskiy. *Diffuziya i teploperedacha v khimicheskoy kinetike* [Diffusion and heat transfer in chemical kinetics]. 2nd ed. Moscow, Nauka Publ., 1967. 484 p. (in Russian).
2. G. Rein. Smoldering combustion. In: M. J. Hurley (editor-in-chief). *SFPE Handbook of Fire Protection Engineering*. 5th ed. New York, NY, Springer, 2016, pp. 581–603. DOI: 10.1007/978-1-4939-2565-0_19.
3. E. R. C. Rabelo, C. A. G. Veras, J. A. Carvalho, E. C. Alvarado, D. V. Sandberg, J. C. Santos. Log smoldering after an Amazonian deforestation fire. *Atmospheric Environment*, 2004, vol. 38, issue 2, pp. 203–211. DOI: 10.1016/j.atmosenv.2003.09.065.
4. A. G. Merzhanov, A. E. Sychev. Self-propagating high-temperature synthesis (in Russian). Available at: http://www.ism.ac.ru/handbook/_shsr.htm (Accessed 20 December 2019).
5. A. G. Merzhanov, A. S. Mukasyan. *Tverdoplamennoye gorenije* [Solid-flame combustion]. 2nd ed. Moscow, Torus Press, 2007. 336 p. (in Russian).
6. G. M. Davies, A. Gray, G. Rein, C. J. Legg. Peat consumption and carbon loss due to smoldering wild-fire in a temperate peatland. *Forest Ecology and Management*, 2013, vol. 308, pp. 169–177. DOI: 10.1016/j.foreco.2013.07.051.
7. R. M. Hadden, G. Rein, C. M. Belcher. Study of the competing chemical reactions in the initiation and spread of smoldering combustion in peat. *Proceedings of the Combustion Institute*, 2013, vol. 34, issue 2, pp. 2547–2553. DOI: 10.1016/j.proci.2012.05.060.
8. G. Rein. Smoldering fires and natural fuels. In: Belcher C. M. (ed.). *Fire phenomena in the earth system — an interdisciplinary guide to fire science*. Chichester, John Wiley & Sons, 2013, pp. 15–33. DOI: 10.1002/9781118529539.ch2.
9. Russian News Agency. *Peat fires in Russia in 2009–2014* (in Russian). Available at: <https://tass.ru/info/1352655> (Accessed 20 December 2019).
10. V. Babrauskas. Pyrophoric carbon and long-term, low temperature ignition of wood. *Fire and Arson Investigator*, 2001, vol. 52, no. 2, pp. 12–14.
11. D. C. Walther, A. C. Fernandez-Pello, D. L. Urban. Space shuttle based microgravity smoldering combustion experiments. *Combustion and Flame*, 1999, vol. 116, issue 3, pp. 398–414. DOI: 10.1016/s0010-2180(98)00095-9.
12. R. Hadden, A. Alkatib, G. Rein, J. L. Torero. Radiant ignition of polyurethane foam: the effect of sample size. *Fire Technology*, 2014, vol. 50, issue 3, pp. 673–691. DOI: 10.1007/s10694-012-0257-x.
13. J. Šesták. *Thermophysical properties of solids: their measurements and theoretical thermal analysis*. Prague, Academia Publ., 1984 (Russ. ed.: Shestak Ya. Teoriya termicheskogo analiza: fiziko-khimicheskiye svoystva tverdykh neorganicheskikh veshchestv. Moscow, Mir Publ., 1987. 456 p.).
14. F. E. Rogers, T. J. Ohlemiller. Pyrolysis kinetics of a polyurethane foam by thermogravimetry. A general kinetic method. *Journal of Macromolecular Science: Part A — Chemistry*, 1981, vol. 15, no. 1, pp. 169–185. DOI: 10.1080/00222338108066438.
15. J. M. Criado. Kinetic analysis of DTG from master curves. *Thermochimica Acta*, 1978, vol. 24, issue 1, pp. 186–189. DOI: 10.1016/0040-6031(78)85151-x.
16. A. A. Kobelev, E. Yu. Kruglov, R. M. Aseeva, B. B. Serkov, F. A. Shutov. Thermal behavior of polymer thermal insulation with the reduced combustibility. *Pozharovzryvobezopasnost/Fire and Explosion Safety*, 2018, vol. 27, no. 4, pp. 13–23 (in Russian). DOI: 10.18322/PVB.2018.27.04.13-23.
17. E. Yu. Kruglov, A. A. Kobelev, F. A. Shutov, R. M. Aseyeva. Thermogravimetric analysis of “Peno-com” polymer foam composite decomposition. *Vse materialy. Entsiklopedicheskii spravochnik / All Materials. Encyclopaedic Reference Manual*, 2016, no. 6, pp. 30–34 (in Russian).
18. A. A. Kobelev, E. Yu. Kruglov, B. B. Serkov, R. M. Aseeva. Regularities of thermo-oxidative degradation of low combustibility polystyrene thermoinsulation. *Pozhary i chrezvychaynyye situatsii: predotvrashcheniye, likvidatsiya / Fire and Emergencies: Prevention, Elimination*, 2018, no. 2, pp. 74–80 (in Russian). DOI: 10.25257/FE.2018.2.74-80.
19. A. A. Kobelev, E. Yu. Kruglov, Yu. K. Naganovskiy, R. M. Aseyeva, B. B. Serkov. Thermal-oxidative destruction of polyisocyanurate heat insulation. *Vse materialy. Entsiklopedicheskii spravochnik / All Materials. Encyclopaedic Reference Manual*, 2018, no. 12, pp. 31–40 (in Russian). DOI: 10.31044/1994-6260-2018-0-12-31-39.

20. H. E. Kissinger. Reaction kinetics in differential thermal analysis. *Analytical Chemistry*, 1957, vol. 29, no. 11, pp. 1702–1706. DOI: 10.1021/ac60131a045.
21. M. G. Grønli, G. Várhegyi, C. Di Blasi. Thermogravimetric analysis and devolatilization kinetics of wood. *Industrial & Engineering Chemistry Research*, 2002, vol. 41, issue 17, pp. 4201–4208. DOI: 10.1021/ie0201157.
22. C. Branca, A. Albano, C. Di Blasi. Critical evaluation of global mechanisms of wood devolatilization. *Thermochimica Acta*, 2005, vol. 429, issue 2, pp. 133–141. DOI: 10.1016/j.tca.2005.02.030.
23. R. S. Miller, J. Bellan. A generalized biomass pyrolysis model based on superimposed cellulose, hemicellulose and lignin kinetics. *Combustion Science and Technology*, 1997, vol. 126, issue 1-6, pp. 97–137. DOI: 10.1080/00102209708935670.
24. R. M. Aseeva, B. B. Serkov, A. B. Sivenkov. *Goreniye drevesiny i yeye pozharoopasnyye svoystva* [Burning wood and its fire behavior]. Moscow, State Fire Academy of Emercom of Russia Publ., 2010. 262 p. (in Russian).
25. M. Poletto, A. J. Zattera, M. M. C. Forte, R. M. C. Santana. Thermal decomposition of wood: Influence of wood components and cellulose crystallite size. *Bioresource Technology*, 2012, vol. 109, pp. 148–153. DOI: 10.1016/j.biortech.2011.11.122.

Поступила 23.12.2019, после доработки 10.01.2020;
принята к публикации 28.01.2020

Received 23 December 2019; Received in revised form 10 January 2020;
Accepted 29 January 2020

Информация об авторах

КРУГЛОВ Евгений Юрьевич, канд. техн. наук, научный сотрудник Учебно-научного центра проблем пожарной безопасности в строительстве, Академия Государственной противопожарной службы МЧС России, г. Москва, Российская Федерация; ORCID: 0000-0003-3684-5083; e-mail: 89268196698@mail.ru

АСЕЕВА Роза Михайловна, д-р хим. наук, профессор кафедры пожарной безопасности в строительстве, Учебно-научный центр проблем пожарной безопасности в строительстве, Академия Государственной противопожарной службы МЧС России, г. Москва, Российская Федерация; ORCID: 0000-0002-2940-9155; e-mail: rm-aseeva@yandex.ru

Information about the authors

Evgeniy Yu. KRUGLOV, Cand. Sci (Eng.), Researcher, Educational Scientific Centre of Problems of Fire Safety in Construction, State Fire Academy of Emercom of Russia, Moscow, Russian Federation; ORCID: 0000-0003-3684-5083; e-mail: 89268196698@mail.ru

Roza M. ASEeva, Dr. Sci. (Chem.), Professor of Fire Safety in Construction Department, Educational Scientific Centre of Problems of Fire Safety in Construction, State Fire Academy of Emercom of Russia, Moscow, Russian Federation; ORCID: 0000-0002-2940-9155; e-mail: rm-aseeva@yandex.ru

Исследование эксплуатационных характеристик огнезащитных покрытий на основе эпоксидных смол, модифицированных астраленами

© А. В. Иванов^{1✉}, С. О. Столяров¹, Ф. А. Деметьев¹, А. П. Ферулев²

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

² ООО “Научно-производственная компания “ОгнеХимЗащита” (Россия, 195279, г. Санкт-Петербург, ш. Революции, 69 А)

РЕЗЮМЕ

Введение. Целью исследования было изучение влияния углеродных наноструктур (УНС) — астраленов на эксплуатационные характеристики огнезащитных вспучивающихся композиций (ОВК), а также установление зависимости огнезащитной эффективности модифицированных вспучивающихся покрытий от их термической стабильности, адгезионной прочности и электрофизических свойств.

Материалы и методы исследований. В качестве объекта исследования использовался огнезащитный вспучивающийся состав “Термобарьер” 2 на основе эпоксидных смол с астраленами в условиях электрофизической модификации. Экспериментальная часть включала исследование методом синхронного термического анализа, измерение диэлектрической проницаемости, определение адгезии методом отрыва, установление взаимосвязи свойств ОВК с условиями модификации методом нейросетевого моделирования, определение огнезащитной эффективности покрытий в условиях факельного горения углеводородов.

Результаты исследования. ОВК, модифицированные астраленами в концентрации 0,1 % об. и подвергшиеся воздействию переменного поля низкой частоты, обладают улучшенными эксплуатационными характеристиками: время наступления предельной температуры защищаемой поверхности выросло с 65 до 96 мин, адгезионная прочность — на 38 %, кислородный индекс — на 11 % в сравнении с базовым составом. При этом экзотермические пики на температурном участке 550–700 °С смещаются на 85 °С в область больших значений относительно базового состава. При электрофизическом воздействии происходит упорядочивание астраленов в материале, о чем свидетельствует снижение диэлектрической проницаемости покрытия на 45 % в сравнении с немодифицированным составом.

Выводы. Модификация огнезащитного состава астраленами ведет к повышению огнезащитной эффективности, адгезионной прочности, термической стабильности, снижению горючести и диэлектрической проницаемости ОВК при условии равномерного распределения астраленов в покрытии в концентрации 0,1 % об. Результаты нейросетевого моделирования позволили сделать выводы, что физико-химический механизм повышения эксплуатационных характеристик ОВК при введении в состав астраленов и электрофизическом воздействии связан с упорядочиванием УНС в матрице полимера, со снижением горючести при увеличении адгезионной прочности покрытия. Данные результатов исследований отражают возможность применения астраленов в качестве компонента рецептур для улучшения эксплуатационных характеристик ОВК на основе эпоксидных смол в условиях факельного горения углеводородов.

Ключевые слова: модификация; огнезащитная эффективность; углеродные наноструктуры; адгезия; термическая стабильность; горючесть; электрофизическое воздействие; нейросетевое моделирование.

Для цитирования: Иванов А. В., Столяров С. О., Деметьев Ф. А., Ферулев А. П. Исследование эксплуатационных характеристик огнезащитных покрытий на основе эпоксидных смол, модифицированных астраленами // Пожаровзрывобезопасность/Fire and Explosion Safety. — 2020. — Т. 29, № 1. — С. 55–68. DOI: 10.18322/PVB.2020.29.01.55-68.

✉ Иванов Алексей Владимирович, e-mail: spark002@mail.ru

Study of the operational characteristics of fireproof coatings based on epoxy resins modified with astralenes

© Alexei V. Ivanov^{1✉}, Svyatoslav O. Stolyarov¹, Fedor A. Dementyev¹, Andrey P. Ferulev²

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

² Research and Production Company “OgneHimZashchita” LLC (Revolutsii Highway, 69 A, Saint Petersburg, 195279, Russian Federation)

ABSTRACT

Introduction. The aim of the research was to study the effect of carbon nanostructures – astralenes on the operational characteristics of flame retardant intumescent compositions (FRIC), as well as to establish the relationship between the flame retardant efficacy of modified intumescent coatings on their thermal stability, adhesive strength and electrophysical properties.

Materials and research methods. The flame retardant intumescent composition “Thermobarrier” 2 based on epoxy resins with astralenes under conditions of electrophysical modification was used as an object of study. The experimental part includes the study by the method of synchronous thermal analysis, the measurement of dielectric permittivity, the determination of adhesion by the separation method, the interconnection of the properties of FRIC from the modification conditions by the method of neural network modeling, the determination of the fire retardant efficiency of coatings in the conditions of hydrocarbon flaring.

Research results. FRIC with astralenes at a concentration of 0.1 % by vol. modified under the influence of an alternating low-frequency field has improved operational characteristics: the time when the limit temperature of the surface to be protected increased from 65 to 96 minutes, the adhesive strength increased by 38 %, the oxygen index increased by 11 % compared to the base composition. At the same time, exothermic peaks in the temperature range of 550–700 °C shifted to the domain of larger values by 85 °C, in comparison to the basic composition. Under electrophysical exposure, a regular arrangement of astralenes in the material occurs, as evidenced by a decrease in the dielectric constant of the coating by 45 %, in comparison to an unmodified composition.

Conclusions. Modification of the flame retardant with astralenes leads to an increase in fire retardant efficiency, adhesive strength, thermal stability, a decrease in the flammability and permittivity of the FRIC, provided that the astralenes are uniformly distributed in the coating at a concentration of 0.1 % by vol. The results of neural network modeling permit to make a conclusion that the physicochemical mechanism of increasing the operational characteristics of FRIC with astralenes introduction and electrophysical effects is associated with the uniform distribution of carbon nanostructures in the polymer matrix, a decrease in combustibility with an increase in the adhesive strength of the coating. The data of the research results reflect the possibility of using astralenes as a component of the formulations to increase the operational characteristics of FRIC based on epoxy resins under the conditions of flaring hydrocarbons combustion.

Keywords: modification; fire retardant efficiency; carbon nanostructures; adhesion; thermal stability; combustibility; electrophysical effects; neural network modeling.

For citation: A. V. Ivanov, S. O. Stolyarov, F. A. Dementyev, A. P. Ferulev. Study of the operational characteristics of fireproof coatings based on epoxy resins modified with astralenes. *Pozharovzryvbezopasnost/Fire and Explosion Safety*, 2020, vol. 29, no. 1, pp. 55–68 (in Russian). DOI: 10.18322/PVB.2020.29.01.55-68.

✉ Alexei Vladimirovich Ivanov, e-mail: spark002@mail.ru

Введение

Одним из способов повышения огнестойкости металлических конструкций является применение специальных огнезащитных вспучивающихся композиций (ОВК). Проблема применения ОВК во многом связана с их недостаточной адгезионной прочностью и термической стабильностью в условиях факельного горения углеводородов [1].

На рынке огнезащиты большее распространение получили вспучивающиеся покрытия на основе эпоксидных смол. В сравнении с другими пленкообразователями они обладают низкой вязкостью, способностью к отверждению при комнатной температуре, минимальной усадкой в процессе отверждения, что обеспечивает низкий уровень внутренних напряжений, высокой адгезией к металлу, а также хорошими антикоррозионными свойствами [1]. В то же время эпоксидные покрытия имеют ряд существенных недостатков, такие как горючесть, хрупкость, низкие прочностные характеристики.

Решение проблемы повышения эксплуатационных характеристик ОВК представляется возможным за счет депонирования в них компонентов, имеющих в своем составе углеродные наноструктуры (УНС), которые при относительно малой концентрации способны обеспечить термическую стабиль-

ность теплоизолирующего защитного слоя и адгезионную прочность в условиях быстрого нарастания температуры и удара струи пламени [2].

Анализ способов модификации ОВК в целях повышения их эксплуатационных характеристик позволил выделить наиболее эффективные модифицирующие добавки с УНС, такие как двухстенные (DWCNT), многостенные (MWCNT) углеродные нанотрубки и астралены (Astr) (табл. 1).

Применение УНС с разными номенклатурными показателями и физико-механическими характеристиками в качестве функционального компонента рецептур ОВК приводит к существенному повышению огнезащитной эффективности, увеличению коксового остатка и адгезионной прочности. Однако применение в качестве модификатора такого вида УНС, как углеродные нанотрубки, для указанных выше веществ в настоящее время ограничено в связи со сложностью синтеза наноструктур с четко заданными номенклатурными характеристиками [10]. Астралены в отличие от УНТ обладают значительно меньшим разбросом качественных характеристик (табл. 2), что делает их перспективными для использования в качестве наномодификаторов для огнезащитных составов.

Таблица 1. Сведения о способах модификации огнезащитных покрытий углеродными наноконпонентами**Table 1.** Information on how to modify fireproof coatings by nanocomponents

Компонент ОБК, функциональное назначение Fireproof coating component, functional application	Вид наноконпонента, его концентрация, % масс. Type of nanocomponent, its concentration, % mass	Эффект от модификации Modification effect	Источник Source
Эпоксидная смола SC-15, отвердитель Epoxy resin SC-15, hardener	DWCNT, 0,05–1,0	Уменьшение коэффициента теплового расширения на 40...70 %; повышение температуры стеклования с 85 до 105 °С Reduction of thermal expansion coefficient by 40...70 %; glass transition temperature increase from 85 to 105 °C	[3]
Эпоксидная композиция, отвердитель Epoxy composition, hardener	MWCNT, 1,0	Снижение температуры стеклования со 170 до 159 °С Glass transition temperature decrease from 170 to 159 °C	[4]
Грунт ГФ-021, растворитель огнезащитного покрытия на основе алкидного связующего "Термобарьер" Priming GF-021, solvent fireproof coating based on alkyd binder "Thermobarrier"	MWCNT, 0,10–1,25 1,0	Увеличение адгезии до 40 %; уменьшение коэффициента вспучивания с 27 до 17 %; повышение огнезащитной эффективности в 3 раза; увеличение коксового остатка на 15,7 %; уменьшение кислородного индекса (КИ) на 11,9 % Adhesion increase up to 40 %; a decrease in the coefficient of expansion from 27 to 17 %, an increase in fire retardant efficiency by 3 times; an increase in coke residue by 15.7 %, a decrease in the oxygen index by 11.9 %	[5]
Меламиноалкидные смолы, растворитель, поверхностно-активные вещества Melaminoalkide resins solvent, surfactants	Углеродные нанотрубки (УНТ), 0,05 Carbon Nanotubes (CNT), 0.05	Уменьшение яркости лакокрасочного покрытия и увеличение его адгезии к защищаемому субстрату Reducing the brightness of the paint coating and increasing the adhesion of the coating to the protected substrate	[6]
Фенилон C2, ферромагнитные частицы Phenylone C2, ferromagnetic particles	MWCNT, 0,03; 0,05; 0,1	Увеличение коэффициента теплового расширения на $0,25 \cdot 10^{-5} \text{ K}^{-1}$ Thermal expansion coefficient increase by $0.25 \cdot 10^{-5} \text{ K}^{-1}$	[7]
ОБК на основе алкидных смол, растворитель Fireproof coating based on alkyd resins, solvent	MWCNT, 0,7–0,9	Увеличение огнезащитной эффективности в 2 раза при содержании MWCNT 0,9 %, адгезии покрытия — с 1,5 до 3 МПа, коксового остатка — с 45 до 93 % A 2-fold increase in fire retardant efficiency with a content of 0.9 %, in coating adhesion from 1.5 to 3 MPa, in coke residue from 45 to 93 %	[8]
Эпоксидный клей, ацетон, спирт Epoxy adhesive, acetone, alcohol	Астралены, 0,25–1,0 Astralene, 0.25–1.0	Увеличение температуры начала термической деструкции на 32 °С, температуры воспламенения вещества на 67 °С, повышение температуры окончания экзотермических процессов An increase in the temperature of the onset of thermal destruction by 32 °C, in the ignition temperature of the substance by 67 °C, in the temperature of the end of exothermic processes	[9]

Таблица 2. Номенклатурные характеристики углеродных наноструктур**Table 2.** The list of samples involved in the study

Характеристика УНС Characteristics of carbon nanostructures	MWCNT	Astr
Размер, нм / The size, nm	200–3000	80–150
Удельная площадь поверхности, м ² /г / Specific surface area, m ² /g	180–1000	2500
Диаметр, нм / Diameter, nm	2–50	10–30

До настоящего времени отсутствуют сведения об эксплуатационных характеристиках ОБК, модифицированных астраленами, в условиях факельного горения углеводородов. Это определило цель настоящего исследования — изучение влияния астраленов на эксплуатационные характеристики ОБК, а также установление зависимости огнезащитной эффективности модифицированных вспучивающихся покрытий от их термической стабильности, адгезионной прочности и электрофизических свойств.

Материалы и методы исследований

В качестве объекта исследования выбран огнезащитный состав “Термобарьер” 2 (ООО НПК “Огне-ХимЗащита”) на основе диановых эпоксидных смол и отвердителя холодного отверждения. В качестве модификатора использовались углеродные наноструктуры — астралены [11].

Исследуемые составы были получены путем смешивания наномодифицированного отвердителя (компонент В) и полимерного связующего на основе эпоксидных смол (компонент А). Перед смешиванием компонентов в отвердитель вводились астралены в концентрации 0,025–0,1 % об. УНС диспергировались при воздействии источника ультразвука с частотой 100 кГц в течение 15 мин при температуре 40 °С. В ходе экспериментов отдельные образцы подвергались электрофизическому воздействию [12] в момент диспергирования и полимеризации на подложке с параметрами переменного электрического поля $U_{\max} = 56$ В, $f = 50$ Гц. При диспергировании наноматериалов электрическое поле воздействовало непосредственно на модифицирующий отвердитель, а при полимеризации подавалось на металлическую подложку в момент нанесения покрытия и последующего отверждения модифицируемого состава в течение 240 мин. Исследуемые образцы, концентрации астраленов и сведения о наличии или отсутствии электрофизического воздействия представлены в табл. 3.

Нанесение огнезащитного покрытия осуществлялось в соответствии с технологическим регламентом № 007 ТУ 20.30.22-007-30642285–2017. В качестве подложки использовались пластины из стали марки Ст3 размером 100×50×6 мм.

Таблица 3. Образцы ОВК на основе состава “Термобарьер” 2 (ТВ 2), используемые в исследовании

Table 3. The list of FPIC samples based on Thermal barrier 2 (ТВ 2) used in the study

Испытуемый образец Test sample	Концентрация Astr в отвердителе, % об. The concentration of Astr in hardener, % by vol.	Электро- физическое воздействие Electrophysical effect
ТВ 2	0	–
ТВ 2 П*	0	+
ТВ 2 Astr 0,1 %	0,1	–
ТВ 2 Astr 0,05 %	0,05	–
ТВ 2 Astr 0,025 %	0,025	–
ТВ 2 Astr 0,1 % П	0,1	+
ТВ 2 Astr 0,05 % П	0,05	+
ТВ 2 Astr 0,025 % П	0,025	+
* П — электрофизическое воздействие / electrophysical effect.		

Термическая стабильность ОВК исследовалась методом синхронного термического анализа (СТА) по ГОСТ Р 53293–2009 на установке STA 449 F 3 Jupiter (компания “Netzsch”, Германия). Исследование термической стабильности осуществлялось в платиновых тиглях (Pt/Rh), в среде воздуха, при скорости подачи газа 75 мл/мин и скорости нагрева 10 °С /мин. Проводилось не менее пяти параллельных испытаний. ДСК-держатель оснащался сенсором типа S. Для обработки результатов СТА использовалось программное обеспечение NETSCH Proteus Thermal Analysis.

Исследование адгезионной прочности проводилось методом отрыва по ГОСТ 32299–2013 и ISO 4624.2002. Измерения выполнялись для трех образцов каждой концентрации, после чего вычислялось среднее значение.

Толщина огнезащитного слоя измерялась магнитным толщиномером МТ-201-00 по ГОСТ Р 51694 и ИСО 2808.

По результатам исследования коксового остатка (КО) в инертной среде был рассчитан кислородный индекс (КИ) ОВК по формуле Ван-Кревелена:

$$КИ = 17,5 + 0,4КО, \quad (1)$$

где КО — коксовый остаток, определенный при температуре 875 °С.

Исследование огнезащитной эффективности образцов проводили на лабораторной установке, моделирующей условия факельного углеводородного горения [1]. Образцы помещали в испытательную камеру с пропан-бутановой горелкой с массовым расходом горючего газа 50...60 г/ч и давлением 0,1 МПа. Температуру газового потока и металлической пластины с тыльной стороны контролировали двумя термомпарами. За предельное состояние принимали достижение металлической пластиной температуры 500 °С по ГОСТ Р 53295–2009. Для каждого образца проводили не менее трех испытаний.

Диэлектрическая проницаемость ε модифицированных огнезащитных покрытий определялась резонансным методом с помощью многофункционального измерителя марки ХЖУ01 [13] и вычислялась по формуле

$$\varepsilon = \frac{C_x d}{A \varepsilon_0}, \quad (2)$$

где C_x — измеренная электрическая емкость, Ф;
 d — расстояние между обкладками конденсатора, м;
 A — площадь обкладок, м²;
 ε_0 — диэлектрическая постоянная, Ф/м;
 $\varepsilon_0 = 8,8518 \cdot 10^{-12}$ Ф/м.

Для оценки вклада УНС в изменение показателей огнезащитной эффективности исследуемых по-

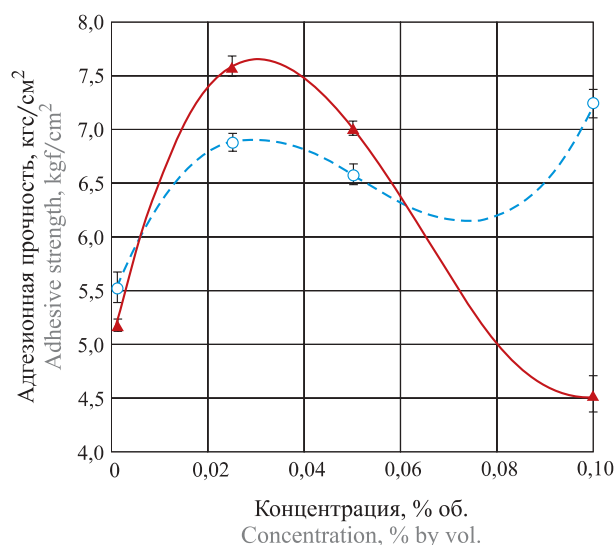


Рис. 1. Адгезионная прочность огнезащитных покрытий, модифицированных астраленами, при электрофизическом воздействии (▲) и без него (○)

Fig. 1. The adhesive strength of fireproof coatings modified with astralenes with electrophysical exposure (▲) and without it (○)

крытий применялся метод нейросетевого моделирования (НС) в программе “Statistica Automated Neural Network” [14].

Результаты исследования

Исследование адгезионной прочности

Исследования показали, что наибольшими значениями адгезионной прочности обладают огнезащитные покрытия с добавлением астраленов 0,025 % об. и при электрофизическом воздействии. При дальнейшем увеличении их концентрации при электрофизическом воздействии адгезионная прочность уменьшается. В случае отсутствия электрофизического воздействия с увеличением концентрации астраленов адгезионная прочность покрытия повышается, но в меньшей степени в сравнении с образцами, подвергшимися электрофизическому воздействию (см. табл. 3, рис. 1).

Результаты синхронного термического анализа

Термограммы ТГ- и ДТГ-анализа исследуемых ОВК представлены на рис. 2.

Анализ ТГ-кривых исследуемых образцов указывает на пять основных этапов потери массы Δm (% масс.) огнезащитной композиции в интервалах температур 210–920 °С. Последний этап достигает своего максимума при температуре 881,9 °С. Добавление астраленов в ОВК способствует поступательному увеличению зольного остатка (ЗО).

Сводные результаты ТГ-анализа исследуемых образцов приведены в табл. 4.

Термограммы ДСК исследуемых образцов представлены на рис. 3.

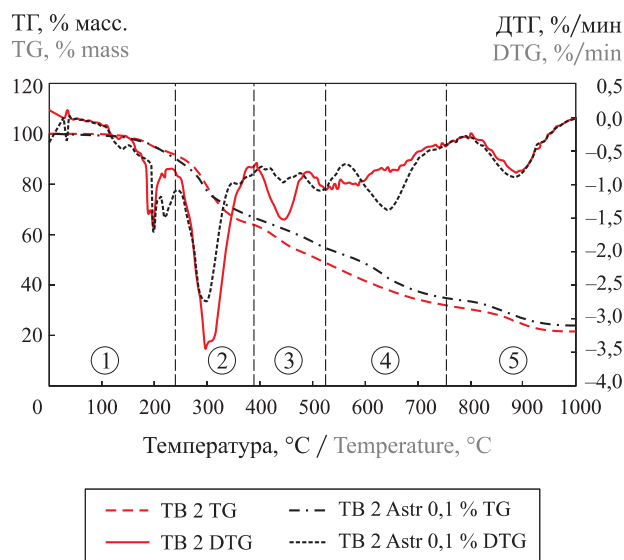


Рис. 2. Термограммы ТГ- и ДТГ-анализа огнезащитного покрытия TB 2 и TB 2 Astr 0,1 % об.: 1–5 — этапы

Fig. 2. Thermograms of TG and DTG analysis of fireproof coating TB 2 and TB 2 Astr 0.1 % by vol.: 1–5 — stages

ДСК, мВт/мг / DSC, mW/mg

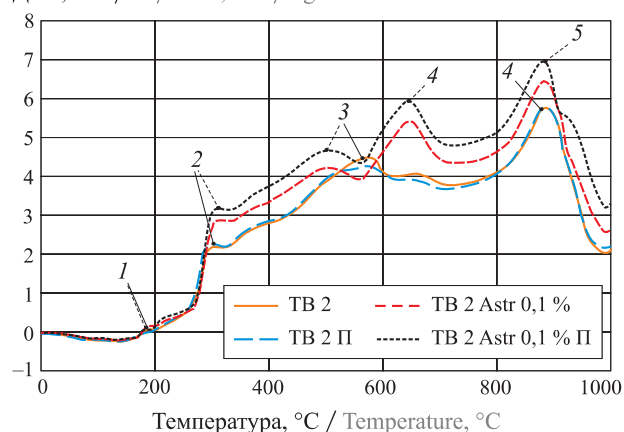


Рис. 3. Термограммы ДСК исследуемых образцов (среда испытания — воздух, скорость нагрева 10 °С/мин): 1–5 — пики

Fig. 3. DSC thermograms of test samples (test medium — air, heating rate 10 °C/min): 1–5 — peaks

Анализ кривых ДСК свидетельствует о наличии четырех экзотермических пиков у немодифицированных образцов “Термобарьер” 2, а у образцов “Термобарьер” 2, модифицированных астраленами 0,1 % об., при электрофизическом воздействии поля и без него наблюдается пять экзотермических пиков (есть пик в интервале температур от 560 до 700 °С).

Сводные результаты ДСК-анализа исследуемых образцов представлены в табл. 5.

По результатам исследования горючести исследуемых образцов (табл. 6) было выявлено, что добавление астраленов способствует увеличению КИ на 1–1,25 %.

Таблица 4. Результаты исследований термической стойкости наномодифицированных огнезащитных покрытий методом ТГА
Table 4. The results of studies of thermal stability of nano-modified fireproof coatings by the TGA method

Состав Composition	Δm , % масс., при температуре t , °C / Δm , % mass, at temperature t , °C					ЗО при 1000 °C, % Ash residue at 1000 °C, %
	22–200	200–400	400–600	600–800	800–1000	
TB2	5,02	32,12	21,27	10,95	8,68	21,96
TB2 П	5,36	31,22	22,35	11,11	8,49	21,47
TB2 Astr 0,1 %	4,99	28,87	17,79	14,89	9,30	24,16
TB2 Astr 0,1 % П	5,82	27,58	18,05	14,97	9,37	24,21
TB 2 Astr 0,025 %	5,74	27,14	18,05	15,29	9,42	24,36
TB 2 Astr 0,025 % П	6,74	26,03	18,58	15,35	9,47	24,41

Таблица 5. Результаты исследований термической стабильности наномодифицированных огнезащитных покрытий методом ДСК
Table 5. The results of studies of thermal stability of nano-modified fireproof coatings by the DSK method

Состав Composition	$T_{ДСК1}$, °C T_{DSC1} , °C	$q_{ДСК1}$, мВт/(мг·мин) q_{DSC1} , mW/(mg·min)	$T_{ДСК2}$, °C T_{DSC2} , °C	$q_{ДСК2}$, мВт/(мг·мин) q_{DSC2} , mW/(mg·min)	$T_{ДСК3}$, °C T_{DSC3} , °C	$q_{ДСК3}$, мВт/(мг·мин) q_{DSC3} , mW/(mg·min)
TB 2	174,8	–0,283	430,0	0,077	778,0	0,039
	191,1	0,100	465,7	–0,162	863,9	0,282
	278,6	–0,728	597,6	0,175	916,9	623,0
	308,9	0,045	636,9	0,059	927,0	0,591
	400,0	0,043	673,0	0,076	991,6	0,207
TB 2 П	172,0	–0,238	465,5	0,165	700,0	0,021
	177,6	0,180	599,9	0,148	858,0	0,314
	275,0	0,816	637,8	0,023	916,5	0,649
	305,1	0,076	676,0	0,061	925,0	0,547
	397,0	0,050	698,0	0,021	995,1	0,133
TB 2 Astr 0,1 % об.	174,4	0,240	469,0	0,093	785,0	–0,062
	193,7	0,166	544,0	0,097	920,0	1,110
	285,0	–1,050	584,0	0,236	927,8	0,245
	322,0	0,027	674,3	0,251	920,1	1,110
	393,0	0,049	697,0	0,131	928,0	0,359
TB 2 Astr 0,1 % об. П	174,0	–0,296	478,0	0,082	776,0	–0,059
	185,4	0,375	544,5	0,121	902,6	1,050
	283,9	1,160	583,2	–0,287	911,1	0,059
	316,0	0,032	667,7	0,301	959,8	0,541
	367,0	0,104	698,0	0,081	988,0	0,288
TB 2 Astr 0,25 % об.	173,7	–0,275	420,0	–3,958	717,0	–4,754
	185,4	0,322	506,5	–4,705	778,0	–4,948
	194,8	–0,242	558,9	–4,266	880,7	–6,817
	228,1	0,009	644,4	–6,070	937,0	–5,086
	282,6	–1,140	644,4	–6,070	986,0	–3,583
TB 2 Astr 0,25 % об. П	173,0	0,240	420,0	0,093	717,0	–0,059
	181,1	0,166	506,5	0,0974	778,0	1,050
	193,8	–1,050	558,9	0,236	880,7	0,059
	222,3	0,027	644,4	0,251	937,0	0,541
	254,8	0,049	644,4	0,131	986,0	0,288

Примечание. $T_{ДСК1}$, $T_{ДСК2}$, $T_{ДСК3}$ — температуры протекания термохимической реакции для интервалов ДСК-анализа соответственно 25–400, 400–700 и 700–1000 °C; $q_{ДСК1}$, $q_{ДСК2}$, $q_{ДСК3}$ — скорости термохимической реакции соответственно при 25–400, 400–700 и 700–1000 °C.

Note. $T_{ДСК1}$, $T_{ДСК2}$, $T_{ДСК3}$ are the thermochemical reaction temperature DSK test intervals 25–400, 400–700 and 700–1000 °C, respectively; $q_{ДСК1}$, $q_{ДСК2}$, $q_{ДСК3}$ are the values of the thermochemical reaction rate for temperatures of 25–400, 400–700 and 700–1000 °C, respectively.

Таблица 6. Результаты исследований горючести исследуемых образцов

Table 6. The results of studies of thermal resistance of the test samples

Исследуемый образец Test sample	КО, % Coke residue, %	КИ, % Oxygen index, %
ТВ 2	26,71	28,18
ТВ 2 П	25,91	27,86
ТВ 2 Astr 0,1 % об.	28,08	28,73
ТВ 2 Astr 0,1 % об. П	28,72	29,00
ТВ 2 Astr 0,025 % об.	29,07	29,13
ТВ 2 Astr 0,025 % об. П	29,52	29,31

Исследование огнезащитной эффективности

По результатам исследования огнезащитной эффективности исследуемых образцов ОВК было выявлено, что добавление астраленов в систему ОВК способствует улучшению данной характеристики (рис. 4). При воздействии факельного горения углеводородов контрольный образец достигает предельной температуры 500 °С на 65-й минуте, в то время как образцы, модифицированные астраленами, способны выдерживать данный режим испытаний в течение более длительного времени и эффективнее в среднем на 45 % при концентрации астраленов в отвердителе 0,1 % об. и воздействии переменного электрического поля.

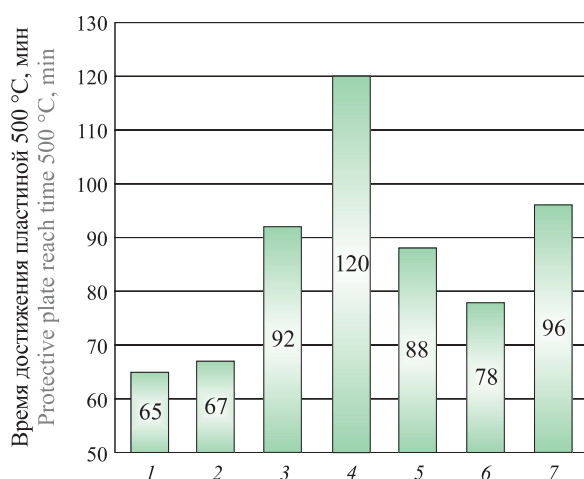


Рис. 4. Гистограмма огнезащитной эффективности исследуемых образцов в условиях факельного горения углеводородов: 1 — ТВ 2; 2 — ТВ 2 Astr 0,025 %; 3 — ТВ 2 Astr 0,05 %; 4 — ТВ 2 Astr 0,10 %; 5 — ТВ 2 Astr 0,025 % П; 6 — ТВ 2 Astr 0,05 % П; 7 — ТВ 2 Astr 0,10 % П

Fig. 4. A histogram of the indicators of fire retardant efficiency of the test samples in the conditions of flaring of hydrocarbons: 1 — ТВ 2; 2 — ТВ 2 Astr 0.025 %; 3 — ТВ 2 Astr 0.05 %; 4 — ТВ 2 Astr 0.10 %; 5 — ТВ 2 Astr 0.025 % П; 6 — ТВ 2 Astr 0.05 % П; 7 — ТВ 2 Astr 0.10 % П

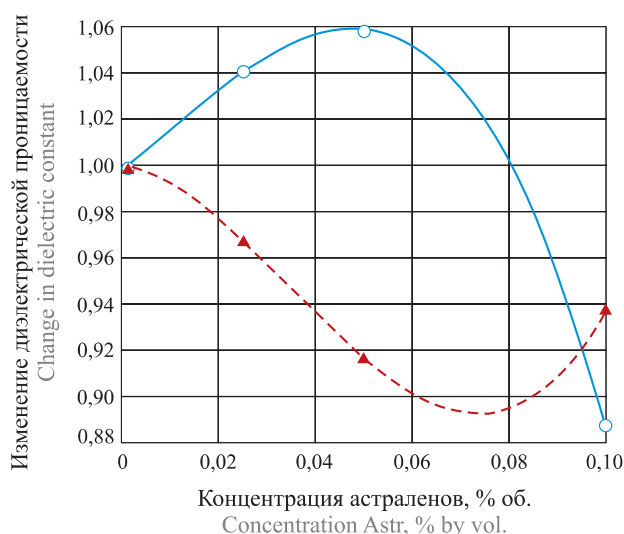


Рис. 5. Динамика изменения диэлектрической проницаемости исследуемых образцов в зависимости от концентрации астраленов при электрофизическом воздействии (▲) и без него (○)

Fig. 5. The dynamics of changes in the dielectric constant of the studied samples on the concentration of Astralenes with electro-physical exposure (▲) and without it (○)

Исследование диэлектрической проницаемости

По результатам исследования диэлектрической проницаемости (ДП) было выявлено, что добавление астраленов в систему ОВК способствует увеличению ДП при концентрациях 0,025–0,05 % об. (рис. 5). Однако увеличение концентрации до 0,1 % об. приводит к значительному снижению показателей исследуемых свойств на 16 %. Показатели ДП образцов, которые были подвергнуты электрофизическому воздействию, при концентрациях астраленов 0,025–0,5 % об. снижаются, а с увеличением концентрации до 0,1 % об. — повышаются.

Прогнозирование эксплуатационных свойств огнезащитных покрытий, модифицированных астраленами, с помощью нейронных сетей

Для оценки вклада факторов, влияющих на параметры огнезащитной эффективности на основе исследуемых образцов, применялся метод нейросетевого моделирования (НС). Характеристики входных параметров представлены в табл. 7.

Регрессионная модель составлена из восьми переменных: семи независимых предикторов ($X_2 \dots X_7$) и одной целевой зависимой переменной (Y). Для создания модели применялась стратегия автоматизированной нейронной сети с размером обучающей, тестовой и контрольной подвыборок соответственно 70, 20 и 10. Тип сети — многослойный персептрон; минимальное и максимальное количество скрытых нейронов — 4 и 20; количество обучающихся сетей — 200 тыс.; количество сохраненных сетей — 50.

Таблица 7. Характеристика входных (воздействующих) параметров и выходного параметра**Table 7.** Characterization of input (acting) parameters and output parameter

Входные и выходной параметры Input and output parameters	Характеристика Characteristic	Ед. изм. Units of measurement
X_1	Концентрация Astr в отвердителе φ Astr concentration in hardener φ	% об. % by vol.
X_2	Адгезионная прочность Adhesive strength	кгс/см ² kgf/cm ²
X_3	Коэффициент вспучивания* $K_{всп}$ Expansion coefficient* K_{exp}	—
X_4	Начало экзотермического пика 1 T_1 The beginning of the exothermic peak 1 T_1	°C
X_5	Начало экзотермического пика 2 T_2 The beginning of the exothermic peak 2 T_2	°C
X_6	Начало экзотермического пика 3 T_3 The beginning of the exothermic peak 3 T_3	°C
X_7	Изменение диэлектрической проницаемости Change in dielectric permeability	—
Y	Время достижения предельного состояния металла The time to reach the limit state of metal	мин min

* $K_{всп} = h_{всп}/h_0$, где $h_{всп}$ — высота вспучивающегося слоя, мм; h_0 — исходная толщина покрытия, мм.
 $K_{int} = h_{int}/h_0$, when h_{int} — the height of the intumescent layer, mm; h_0 — initial coating thickness, mm.

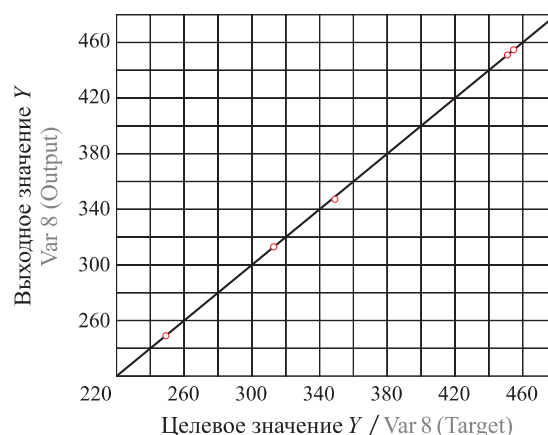
Из 50 сохраненных сетей выбрана одна с минимальной ошибкой контрольной выборки (табл. 8). Данная модель является наиболее “адекватной”, что

Таблица 8. Параметры сетей с минимальной ошибкой контрольной выборки**Table 8.** Network parameters with the minimum control sample error

Индекс Index	Имя сети Network Name	Производительность обучения Training performance	Проверка теста Test performance	Проверка работоспособности Validation performance	Ошибка обучения Training error
15	MLP 6-12-1	0,999996	0,00001	0,00001	0,023
Тестовая ошибка Test error	Проверочная ошибка Validation error	Алгоритм обучения Training algorithm	Функция ошибки Error function	Скрытая активация Hidden activation	Активация выхода Output activation
0,0000	303795	BFGS 21	SOS	Exponential	Identity

Таблица 9. Анализ чувствительности переменных / **Table 9.** Analysis of the sensitivity of variables

Индекс Index	Характеристика сети Network characteristic	Вклад переменных / Variable contribution					
15	MLP 6-12-1	Var 7 (X_7)	Var 4 (X_4)	Var 5 (X_5)	Var 6 (X_6)	Var 3 (X_3)	Var 2 (X_2)
		508270,4	235155,9	215627,5	131323,9	9325,992	553,2081

**Рис. 6.** Диаграмма рассеяния целевых значений сетей
Fig. 6. Target Scatter Chart

обусловлено высокой обучающей производительностью и минимальной контрольной ошибкой. Это подтверждается диаграммой рассеяния целевых значений выбранных сетей (15.MLP 6-12-1) и выходного значения Y (рис. 6). Из рисунка видно, что диаграмма рассеяния целевых значений отражает совпадение входных данных и целевой переменной.

Анализ чувствительности переменных показывает важность таких входных параметров, как изменение диэлектрической проницаемости (X_7), начало экзотермического пика 1 (X_4), начало экзотермического пика 2 (X_5), а также адгезионная прочность (X_2) (табл. 9).

Нейронная сеть 15.MLP 7-12-1 отражает данные с наименьшей ошибкой и позволяет спрогнозировать время достижения предельного состояния металла, защищаемого ОВК, а также отображает зависимость огнезащитной эффективности огнезащитных покрытий, модифицированных астраленами, от адгезионной прочности и коэффициента вспучивания (рис. 7). С увеличением коэффициента вспу-

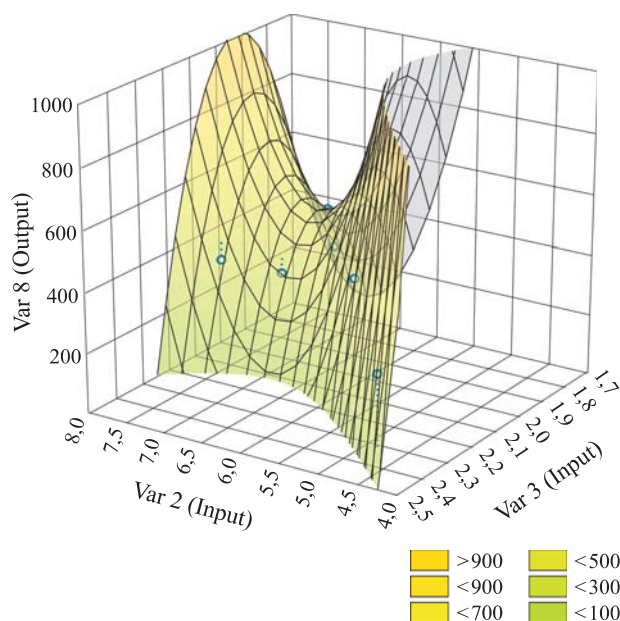


Рис. 7. Зависимость огнезащитной эффективности (Var 8) исследуемых образцов от коэффициента вспучивания (Var 3) и адгезионной прочности (Var 2)

Fig. 7. Dependence of fire retardant efficiency (Var 8) of the test samples on the coefficient of expansion (Var 3) and adhesive strength (Var 2)

чивания адгезионная прочность повышается, а затем уменьшается. При электрофизическом воздействии переменного поля огнезащитная эффективность и время достижения металлом предельного состояния изменяются в большем диапазоне и достигают максимума при значениях адгезионной прочности $7,6 \text{ кгс/см}^2$ и коэффициента вспучивания 2,1. В этих условиях при увеличении коэффициента вспучивания адгезионная прочность снижается.

Обсуждение результатов исследования

Термограммы исследуемых образцов ОВК характеризуются комплексом последовательных эндотермических пиков и постепенной потерей массы в широком интервале температур. Термограммы ОВК, модифицированных астраленами, отличаются от термограмм базового огнезащитного покрытия наличием экзотермических пиков в диапазоне температур $560\text{--}700^\circ\text{C}$, что позволяет сделать вывод о наличии экзотермической реакции на данном участке. Это может быть связано с удалением алифатических фрагментов из структуры полимера, насыщением теплоизолирующего слоя NH-группами вторичных аминов с последующей карбонизацией [15].

Температуры максимумов на кривых ДСК-пиков в ОВК, модифицированных астраленами, смещены в область меньших значений, т. е. процесс образования теплоизолирующего слоя начинается раньше. Изменение массы на участке температур $200\text{--}400^\circ\text{C}$ для модифицированных образцов различается на

$3,8\text{--}5,6\%$, а скорость потери массы — на $1,5\%$ /мин, что свидетельствует о протекании процесса термодеструкции самой композиции и термоокислительной деструкции компонентов механизма интумесценции. Максимальная скорость потери массы соответствует интервалу температур $222\text{--}381^\circ\text{C}$. Расхождение термограмм ДСК исследуемых образцов прослеживается на температурном участке при температуре 301°C . Образец “Термобарьер” 2 характеризуется меньшим (на $10,5\%$) значением коксового остатка, что свидетельствует о его более низкой термостойкости в сравнении с модифицированными образцами. Для уменьшения скорости потери массы ОВК оптимальным представляется применение углеродных наноструктур в концентрациях $0,025\text{--}0,5\%$ об.

Анализ результатов термического анализа свидетельствует о сравнительно высоких значениях коксового остатка для модифицируемых покрытий ($21,47\text{--}27,2\%$), что позволяет сделать вывод о повышении термической стабильности в сравнении с немодифицированными образцами, при этом увеличиваются значения кислородного индекса от $0,55$ до $1,13\%$ при содержании астраленов в отвердителе $0,025\text{--}0,1\%$ об.

Исследование огнезащитной эффективности исследуемых образцов показало наибольшее увеличение огнезащитной эффективности ОВК при концентрации астраленов в отвердителе $0,025$ и $0,1\%$ об.

По результатам синхронного термического анализа (СТА) было выявлено, что наилучшими показателями термической стойкости обладают ОВК, модифицированные астраленами в концентрации $0,025$ и $0,1\%$ об. По результатам исследования адгезионной прочности наилучшими показателями обладают также ОВК, модифицированные астраленами в концентрации $0,025\%$ об. и подвергнутые электрофизическому воздействию.

Высокая теплопроводность астраленов [16] способствует локальной передаче тепловой энергии, которая инициирует процесс дегидратации полимера и увеличение скорости вспучивания (о чем свидетельствуют пики на термограмме ДСК в диапазоне температур $260\text{--}330^\circ\text{C}$).

При введении астраленов в эпоксидный полимер на границе полимер — металл силы ван-дер-ваальсового взаимодействия усиливаются, что приводит к изменению трехмерной структуры композита (рис. 8) [17].

За счет механического проникновения адгезива в поры и микротрещины защищаемой поверхности астралены, соизмеримые с размерами пор металла, образуют каркасную структуру, что увеличивает адгезионную прочность исследуемых образцов. Аналогичное явление прослеживается и у других видов

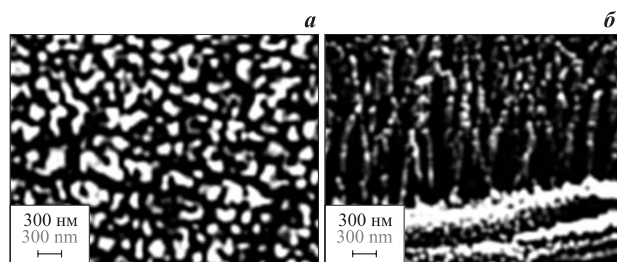


Рис. 8. Структура отвержденной эпоксидной матрицы BC-2526, полученная методом сканирующей электронной микроскопии (SEM): *a* — до введения астраленов; *b* — после введения 3,6 % астраленов [17]

Fig. 8. The structure of the cured epoxy matrix BC-2526, obtained by scanning electron microscopy (SEM): *a* — before introduction of astralenes; *b* — after administration of 3.6 % introduction [17]

УНС [18–20]. Таким образом, данное явление можно охарактеризовать как эффект “наноармирования” полимера ОВК.

Эффект наноармирования [21] способствует увеличению механической прочности пенококка, что позволяет повысить когезионную прочность защитного слоя и сохранить теплоизоляционные свойства в условиях эрозийного воздействия пламени факельного горения углеводородов [22].

В ходе нейросетевого моделирования выявлено, что факторами огнезащитной эффективности ОВК при депонировании астраленов в отвердитель являются: уменьшение диэлектрической проницаемости, вызванное структуризацией УНС при формировании ОВК, начало экзотермического пика 1, начало экзотермического пика 2, адгезионная прочность.

Наиболее оптимальным условием для достижения оптимальных параметров огнезащитной эффективности огнезащитного покрытия, модифицированного астраленами, является адгезионная прочность 7–8 кгс/см² и коэффициент вспучивания порядка 2,35, что соответствует концентрации астраленов 0,025 % об. с электрофизическим воздействием и 0,1 % об. без электрофизического воздействия. С уменьшением адгезионной прочности скорость роста температуры образца при воздействии факельного горения углеводородов увеличивается.

Увеличение концентрации астраленов в системе ОВК при одновременном снижении диэлектрической проницаемости приводит к повышению огнезащитной эффективности состава (рис. 9). Достижение максимальных значений огнезащитной эффективности представляется возможным при характеристиках в области концентраций астраленов 0,05–0,12 % об.

Исследование зависимости огнезащитной эффективности вспучивающихся покрытий от адгезионной прочности показало, что электрофизическое воздействие способствует увеличению огнезащитной эффективности и адгезионной прочности в от-

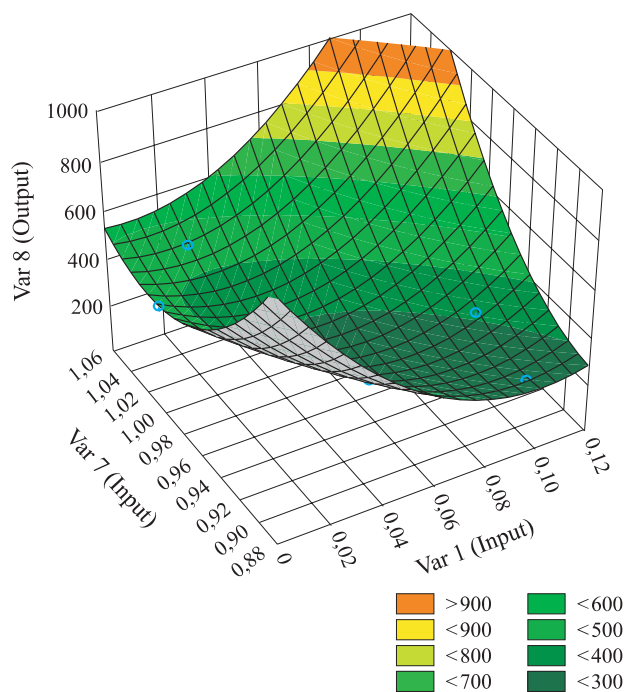


Рис. 9. Зависимость огнезащитной эффективности (Var 8) от концентрации астраленов в отвердителе (Var 1) и диэлектрической проницаемости ОВК (Var 7)

Fig. 9. The dependence of fire retardant efficiency on the concentration of astralenes in the hardener and the dielectric constant of FRIC

личие от образцов без электрофизического воздействия, что вызвано структуризацией УНС в ОВК. Показатели адгезионной прочности влияют на огнезащитную эффективность исследуемых образцов (рис. 10). Адгезионная прочность образцов, подвергшихся электрофизическому воздействию, изменяется в пределах 4,5–7,6 кгс/см². При этом максимальных значений огнезащитной эффективности исследуемые образцы достигают при адгезионной прочности от 4,5 до 7 кгс/см². Данные значения соответствуют концентрациям астраленов в отвердителе 0,05 и 0,1 % об. Промежуточное значение 5,5 кгс/см² соответствует наименьшему значению огнезащитной эффективности, характерной для немодифицированных образцов. Максимальным значениям адгезионной прочности и огнезащитной эффективности соответствует образец, модифицированный астраленами в концентрации 0,1 % об. без электрофизического воздействия. Модификация огнезащитных составов исследуемыми УНС способствует повышению огнезащитной эффективности и адгезионной прочности за исключением образца, модифицированного астраленами в концентрации 0,025 % об. без электрофизического воздействия.

Исследование зависимости огнезащитной эффективности ОВК от диэлектрической проницаемости (рис. 11) показало, что с ее уменьшением огнезащитная эффективность возрастает на 29 %. Очевид-

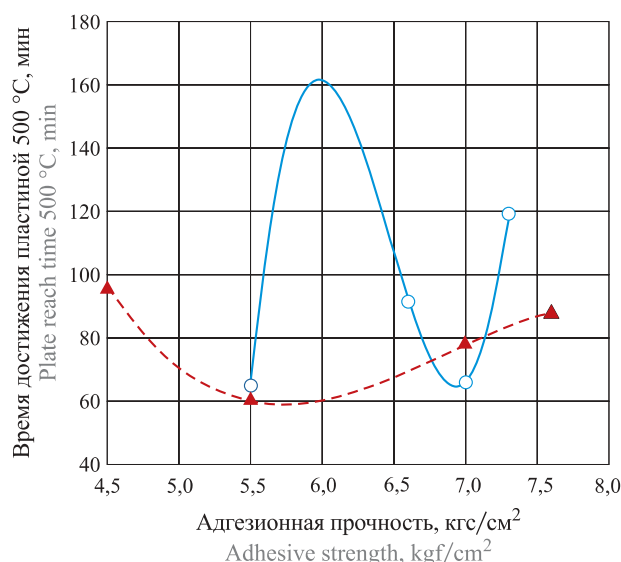


Рис. 10. Зависимость огнезащитной эффективности от адгезионной прочности исследуемых образцов при электрофизическом воздействии (▲) и без него (○)

Fig. 10. The dependence of fire retardant efficiency on the concentration of astralenes on the adhesive strength indicators of studied samples with electrophysical impact (▲) and without it (○)

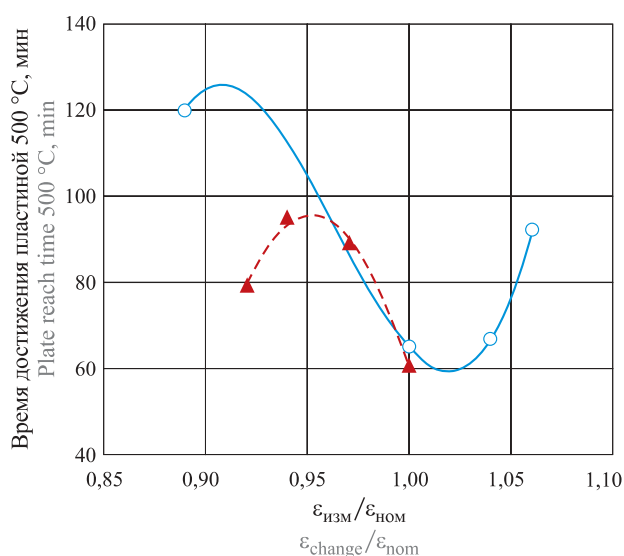


Рис. 11. Зависимость огнезащитной эффективности от диэлектрической проницаемости при электрофизическом воздействии (▲) и без него (○)

Fig. 11. Dependence of fire retardant efficiency on dielectric permeability with electrophysical impact (▲) and without it (○)

но, что равномерность распределения наноструктур в полимере напрямую влияет на огнезащитную эффективность ОВК. Чем больше электропроводность ОВК, модифицированных астраленами, тем выше их огнезащитные характеристики. Равномерное распределение наноструктур достигается путем электрофизического воздействия переменного электрического поля [10].

Выводы

По результатам исследования было выявлено, что добавление астраленов в концентрациях 0,025–0,1 % об. в систему отвердителя ОВК на основе эпоксидных смол с последующим электрофизическим воздействием способствует улучшению эксплуатационных характеристик: увеличению адгезионной прочности на 38,2 %, уменьшению горючести материала на 10,5 %, увеличению зольного остатка на 11 %, а также изменению электрофизических свойств вещества. Это приводит к повышению огнезащитной эффективности на 44,7 %.

Анализ расчетных значений горючести исследуемых образцов выявил, что астралены несущественно влияют на снижение горючести материала, увеличивая термическую стабильность на 1,00–1,25 %.

Снижение диэлектрической проницаемости ОВК при концентрациях астраленов 0,025–0,1 % об. и электрофизическом воздействии свидетельствует об увеличении электропроводности исследуемых образцов и более равномерном распределении наноструктур в системе ОВК за счет электрофизического воздействия на исследуемые образцы.

Наноармирование образцов ОВК астраленами позволяет ограничить распространение пламени на поверхности полимера и увеличить время его полного выгорания, что придает защитному теплоизолирующему слою “кокса” большую термическую стабильность в сравнении с базовым составом и обеспечивает более высокие показатели адгезионной прочности полимера по отношению к металлу.

Нейросетевое моделирование процесса влияния астраленов на огнезащитную эффективность ОВК показывает, что существует зависимость огнезащитной эффективности от концентрации астраленов в отвердителе и диэлектрической проницаемости, начала температуры экзотермических реакций и адгезионной прочности. Установление этой зависимости позволит обеспечить создание условий для повышения огнезащитной эффективности ОВК при тепловом и эрозийном воздействии факельного горения углеводородов.

Установление взаимосвязи между огнезащитной эффективностью ОВК и их термической стабильностью, адгезионной прочностью и электрофизическими свойствами показало, что модификация огнезащитных составов астраленами способствует повышению огнезащитной эффективности и адгезионной прочности, за исключением образца, модифицированного астраленами в концентрации 0,025 % об. без электрофизического воздействия. Можно сделать вывод, что с увеличением электропроводности модифицированных ОВК повышаются их огнезащитные характеристики.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Цой А. А. Методика определения эффективности огнезащитных покрытий для стальных конструкций в условиях факельного углеводородного горения : дис. ... канд. техн. наук. — СПб., 2017. — 134 с.
2. Мостовой А. С. Разработка составов, технологии и определение свойств микро- и нанонаполненных эпоксидных композитов функционального назначения : дис. ... канд. техн. наук. — Саратов, 2014. — 153 с.
3. Ganguli S., Aglan H., Dennig P., Irvin G. Effect of loading and surface modification of MWCNTs on the fracture behavior of epoxy nanocomposites // *Journal of Reinforced Plastics and Composites*. — 2006. — Vol. 25, No. 2. — P. 175–188. DOI: 10.1177/0731684405056425.
4. Кондрашов С. В., Дьячкова Т. П., Богатов В. А., Мансурова И. А., Мараховский П. С., Мокрецова И. А., Фокин А. С. Использование углеродных нанотрубок для увеличения теплостойкости эпоксидных связующих // *Перспективные материалы*. — 2013. — № 2. — С. 17–23.
5. Иванов А. В., Боева А. А., Ивахнюк Г. К., Терехин С. Н., Пророк В. Я. Исследование эксплуатационных характеристик наномодифицированных огнезащитных вспучивающихся композиций в условиях углеводородного пожара на объектах транспортировки нефтепродуктов // *Пожаровзрывобезопасность/Fire and Explosion Safety*. — 2017. — Т. 26, № 10. — С. 5–19. DOI: 10.18322/PVB.2017.26.10.5-19.
6. Николайчик А. В., Прокопчук Н. Р. Выбор оптимального способа введения углеродных наноматериалов в органорастворимые лакокрасочные материалы // *Труды БГТУ. Серия 4: Химия, технология органических веществ и биотехнология*. — 2009. — Т. 1, № 4. — С. 68–71.
7. Яновский Ю. Г., Козлов Г. В., Бура А. И., Липатов Ю. С. Тепловое расширение полимерных композитов, наполненных углеродными нанотрубками // *Физическая мезомеханика*. — 2007. — Т. 10, № 6. — С. 63–67.
8. Зыбина О. А. Теоретические принципы и технология огнезащитных вспучивающихся материалов : дис. ... д-ра техн. наук. — СПб., 2015. — 260 с.
9. Иванов А. В., Скрипник И. Л., Дементьев Ф. А., Ловчиков В. А. Исследование модифицированных полимерных композиций для улучшения их свойств // *Техносферная безопасность*. — 2019. — № 1(22). — С. 89–96.
10. Shames A. I., Katz E. A., Panich A. M., Mogilyansky D., Mogilko E., Grinblat J., Belousov V. P., Belousova I. M., Ponomarev A. N. Structural and magnetic resonance study of astralen nanoparticles // *Diamond and Related Materials*. — 2009. — Vol. 18, No. 2–3. — P. 505–510. DOI: 10.1016/j.diamond.2008.10.056.
11. Yu C., Yang J., Zhao C., Fan X., Wang G., Qiu J. Nanohybrids from NiCoAl-LDH coupled with carbon for pseudocapacitors: understanding the role of nano-structured carbon // *Nanoscale*. — 2014. — Vol. 6, No. 6. — P. 3097–3104. DOI: 10.1039/c3nr05477b.
12. Пат. 2479005 Российская Федерация. МПК G05B 24/02 (2006.01), H03B 28/00 (2006.01). Способ и устройство управления физико-химическими процессами в веществе и на границе раздела фаз / Ивахнюк Г. К., Матюхин В. Н., Ключков В. А., Шевченко А. О., Князев А. С., Ивахнюк Г. К., Иванов А. В., Родионов В. А. — № 2011118347/08; заявл. 21.01.2010; опубл. 10.04.2013, Бюл. № 10.
13. Baker N., Armstrong J. A. Von Hippel–Lindau disease // *Neurocutaneous Disorders*. — 2004. — P. 66–70. DOI: 10.1017/cbo9780511545054.009.
14. Королев Д. С., Калач А. В., Каргашилов Д. В., Сорокина Ю. Н. Прогнозирование основных показателей пожаровзрывоопасности органических соединений с помощью дескрипторов и искусственных нейронных сетей, используемых в расчете пожарного риска // *Пожаровзрывобезопасность/Fire and Explosion Safety*. — 2015. — Т. 24, № 9. — С. 32–38. DOI: 10.18322/PVB.2015.24.09.32-38.
15. Павлович А. В., Дринберг А. С., Машиляковский Л. Н. Огнезащитные вспучивающиеся лакокрасочные покрытия. — М. : ЛКМ-пресс, 2018. — 488 с.
16. Zhang Y., Xiao S., Wang Q., Liu S., Qiao Z., Chi Z., Xu J., Economy J. Thermally conductive, insulated polyimide nanocomposites by AlO(OH)-coated MWCNTs // *Journal of Materials Chemistry*. — 2011. — Vol. 21, No. 38. — P. 14563–14568. DOI: 10.1039/C1JM12450A.
17. Гуняев Г. М., Комарова О. А., Ильченко С. И., Алексакин В. М., Пономарев А. Н., Деев И. С., Никитин В. А. Фуллероидные наноматериалы — активные структурные модификаторы полимеров и полимерных композитов // *Пластические массы*. — 2003. — № 10. — С. 18–21.
18. Frankland S. J. V., Caglar A., Brenner D. W., Griebel M. Molecular simulation of the influence of chemical cross-links on the shear strength of carbon nanotube — polymer interfaces // *The Journal of Physical Chemistry B*. — 2002. — Vol. 106, No. 12. — P. 3046–3048. DOI: 10.1021/jp015591+.

19. Ильченко С. И., Гуняев Г. М., Алексаин В. М., Пономарев А. Н., Комарова О. А., Деев И. С. Углеродные наночастицы, структурные модификаторы и упрочнители полимеров и полимерных композитов // *Авиационные материалы и технологии*. — 2004. — № 2. — С. 36–54.
20. Bourbigot S., Le Bras M., Delobel R. Carbonization mechanisms resulting from intumescence association with the ammonium polyphosphate-pentaerythritol fire retardant system // *Carbon*. — 1993. — Vol. 31, No. 8. — P. 1219–1230. DOI: 10.1016/0008-6223(93)90079-p.
21. Kazakov U. N., Petrosyan S. M., Datcenko A. A. Nanoreinforcing of slip rings for maintenance of an arch stabilisation and erosive firmness // 2010 International Conference on Actual Problems of Electron Devices Engineering. — IEEE, 2010. — P. 355–362. DOI: 10.1109/apede.2010.5624087.
22. Kugler S., Kowalczyk K., Szychaj T. Hybrid carbon nanotubes/graphene_modified_acrylic_coats // *Progress in Organic Coatings*. — 2015. — Vol. 85. — P. 1–7. DOI: 10.1016/j.porgcoat.2015.02.019.

REFERENCES

1. A. A. Tsoy. *Method for determining the effectiveness of flame retardant coatings for steel structures under flare hydrocarbon combustion conditions*. Cand. Sci. (Eng.) Diss. Saint Petersburg, 2017. 134 p. (in Russian).
2. A. S. Mostovoy. *Development of compositions, technologies and determination of the properties of micro- and nanofilled epoxy composites for functional purposes*. Cand. Sci. (Eng.) Diss. Saratov, 2014. 153 p. (in Russian).
3. S. Ganguli, H. Aglan, P. Denning, G. Irvin. Effect of loading and surface modification of MWCNTs on the fracture behavior of epoxy nanocomposites. *Journal of Reinforced Plastics and Composites*, 2006, vol. 25, no. 2, pp. 175–188. DOI: 10.1177/0731684405056425.
4. S. V. Kondrashev, T. P. Dyachkova, V. A. Bogatov, I. A. Mansurova, P. S. Marakhovskii, I. A. Mokretsova, A. S. Fokin. Use of carbon nanotubes for epoxy binders heat resistance increase. *Perspektivnye materialy / Perspective Materials*, 2013, no. 2, pp. 17–23 (in Russian).
5. A. V. Ivanov, A. A. Boeva, G. K. Ivakhnyuk, S. N. Terekhin, V. Ya. Prorok. Research of operational characteristics of nanomodified fire-resistant intumescent compositions in the conditions of hydrocarbon fire at oil transportation facilities. *Pozharovzryvbezopasnost / Fire and Explosion Safety*, 2017, vol. 26, no. 10, pp. 5–19 (in Russian). DOI: 10.18322/PVB.2017.26.10.5-19.
6. A. V. Nikolaychik, N. R. Prokopchuk. Selection of the optimal method for introducing carbon nanomaterials into organosoluble paints and varnishes. *Trudy BGTU. Seriya 4: Khimiya, tekhnologiya organicheskikh veshchestv i biotekhnologiya / Proceedings of BSTU. Series 4: Chemistry, Organic Substances Technology and Biotechnology*, 2009, vol. 1, no. 4, pp. 68–71 (in Russian).
7. Yu. G. Yanovsky, G. V. Kozlov, A. I. Burya, Yu. S. Lipatov. Thermal expansion of polymer composites filled with carbon nanotubes. *Fizicheskaya mezomekhanika / Physical Mesomechanics*, 2007, vol. 10, no. 6, pp. 63–67 (in Russian).
8. O. A. Zybyna. *Theoretical principles and technology of fire-retardant intumescent materials*. Dr. Sci. (Eng.) Diss. Saint Petersburg, 2015. 260 p. (in Russian).
9. A. V. Ivanov, I. L. Skrypnik, F. A. Dementiev, V. A. Lovchikov. Study of modified polymeric compositions to improve their properties. *Tekhnosfermaya bezopasnost / Technosphere Safety*, 2019, no. 1(22), pp. 89–96 (in Russian).
10. A. I. Shames, E. A. Katz, A. M. Panich, D. Mogilyansky, E. Mogilko, J. Grinblat, V. P. Belousov, I. M. Belousova, A. N. Ponomarev. Structural and magnetic resonance study of astralen nanoparticles. *Diamond and Related Materials*, 2009, vol. 18, no. 2-3, pp. 505–510. DOI: 10.1016/j.diamond.2008.10.056.
11. C. Yu, J. Yang, C. Zhao, X. Fan, G. Wang, J. Qiu. Nanohybrids from NiCoAl-LDH coupled with carbon for pseudocapacitors: understanding the role of nano-structured carbon. *Nanoscale*, 2014, vol. 6, no. 6, pp. 3097–3104. DOI: 10.1039/c3nr05477b.
12. G. K. Ivakhnjuk, V. N. Matjukhin, V. A. Klachkov, A. O. Shevchenko, A. S. Knjazev, K. G. Ivakhnjuk, A. V. Ivanov, V. A. Rodionov. *Method and apparatus for controlling physical-chemical processes in substance and on a phase boundary*. Patent RU, no. 2479005, publ. date 10.04.2013, bull. no. 10 (in Russian).
13. N. Baker, J. A. Armstrong. Von Hippel–Lindau disease. *Neurocutaneous Disorders*, 2004, pp. 66–70. DOI: 10.1017/cbo9780511545054.009.
14. D. S. Korolev, A. V. Kalach, D. V. Kargashilov, Yu. N. Sorokina. Forecast of major indicators of fire and inflammation organic compounds using descriptors and artificial neural networks used in the evaluation of fire risk. *Pozharovzryvbezopasnost / Fire and Explosion Safety*, 2015, vol. 24, no. 9, pp. 32–38 (in Russian). DOI: 10.18322/PVB.2015.24.09.32-38.

15. A. V. Pavlovich, A. S. Drinberg, L. N. Mashlyakovskiy. *Ognezashchitnyye vspuchivayushchiyesya lakokrasochnyye pokrytiya* [Fireproof intumescent coatings]. Moscow, LKM-press Publ., 2018. 488 p. (in Russian).
16. Y. Zhang, S. Xiao, Q. Wang, S. Liu, Z. Qiao, Z. Chi, J. Xu, J. Economy. Thermally conductive, insulated polyimide nanocomposites by AlO(OH)-coated MWCNTs. *Journal of Materials Chemistry*, 2011, vol. 21, no. 38, pp. 14563–14568. DOI: 10.1039/C1JM12450A.
17. G. M. Gunyaev, O. A. Komarova, S. I. Ilchenko, V. M. Aleksashin, A. N. Ponomarev, I. S. Deev, V. A. Nikitin. Fulleroid nanomaterials — active structural modifiers of polymers and polymer composites. *Plasticheskie massy / Plastics*, 2003, no. 10, pp. 18–21 (in Russian).
18. S. J. V. Frankland, A. Caglar, D. W. Brenner, M. Griebel. Molecular simulation of the influence of chemical cross-links on the shear strength of carbon nanotube — polymer interfaces. *The Journal of Physical Chemistry B*, 2002, vol. 106, no. 12, pp. 3046–3048. DOI: 10.1021/jp015591+.
19. S. I. Ilchenko, G. M. Gunyaev, V. M. Aleksashin, A. N. Ponomarev, O. A. Komarova, I. S. Deev. Carbon nanoparticles, structural modifiers and hardeners of polymers and polymer composites. *Aviacionnyye materialy i tekhnologii / Aviation Materials and Technologies*, 2004, no. 2, pp. 36–54 (in Russian).
20. S. Bourbigot, M. Le Bras, R. Delobel. Carbonization mechanisms resulting from intumescence association with the ammonium polyphosphate-pentaerythritol fire retardant system. *Carbon*, 1993, vol. 31, no. 8, pp. 1219–1230. DOI: 10.1016/0008-6223(93)90079-p.
21. U. N. Kazakov, S. M. Petrosyan, A. A. Datcenko. Nanoreinforcing of slip rings for maintenance of an arch stabilisation and erosive firmness. In: *2010 International Conference on Actual Problems of Electron Devices Engineering*. IEEE, 2010, pp. 355–362. DOI: 10.1109/apede.2010.5624087.
22. S. Kugler, K. Kowalczyk, T. Szychaj. Hybrid carbon nanotubes/graphene modified acrylic coats. *Progress in Organic Coatings*, 2015, vol. 85, pp. 1–7. DOI: 10.1016/j.porgcoat.2015.02.019.

Поступила 26.12.2019, после доработки 20.01.2020;
принята к публикации 02.02.2020

Received 26 December 2019; Received in revised form 20 January 2020;
Accepted 2 February 2020

Информация об авторах

ИВАНОВ Алексей Владимирович, канд. техн. наук, доцент, доцент кафедры пожарной безопасности технологических процессов и производств, Санкт-Петербургский университет ГПС МЧС России, г. Санкт-Петербург, Российская Федерация; Researcher ID: S-9000-2019; ORCID: 0000-0002-4854-9321; e-mail: spark002@mail.ru

СТОЛЯРОВ Святослав Олегович, адъюнкт кафедры пожарной безопасности технологических процессов и производств, Санкт-Петербургский университет государственной противопожарной службы МЧС России, г. Санкт-Петербург, Российская Федерация; Researcher ID: AAN-8533-2019; ORCID: 0000-0002-6460-209X; e-mail: 79990252529@yandex.ru

ДЕМЕНТЬЕВ Федор Алексеевич, канд. техн. наук, доцент, доцент кафедры криминалистики и инженерно-технических экспертиз, Санкт-Петербургский университет государственной противопожарной службы МЧС России, г. Санкт-Петербург, Российская Федерация; ORCID: 0000-0003-1863-3001; e-mail: demafa@mail.ru

ФЕРУЛЕВ Андрей Петрович, директор по развитию ООО “Научно-производственная компания “ОгнеХим-Защита”, г. Санкт-Петербург, Российская Федерация; ORCID: 0000-0001-7774-6212; e-mail: mail@OgneHimZashita.ru

Information about the authors

Alexei V. IVANOV, Cand. Sci. (Eng.), Docent, Associate Professor of Department of Fire Safety of Technological Processes and Production, Saint Petersburg University of State Fire Service of Emercom of Russia, Saint Petersburg, Russian Federation; Researcher ID: S-9000-2019; ORCID: 0000-0002-4854-9321; e-mail: spark002@mail.ru

Svyatoslav O. STOLYAROV, Adjunct, Department of Fire Safety of Technological Processes and Production, Saint Petersburg University of the State Fire Service of Emercom of Russia, Saint Petersburg, Russian Federation; Researcher ID: AAN-8533-2019; ORCID: 0000-0002-6460-209X; e-mail: 79990252529@yandex.ru

Fedor A. DEMENTYEV, Cand. Sci. (Eng.), Docent, Associate Professor of Criminalistics and Engineering Expertise Department, Saint Petersburg University of State Fire Service of Emercom of Russia, Saint Petersburg, Russian Federation; ORCID: 0000-0003-1863-3001; e-mail: demafa@mail.ru

Andrey P. FERULEV, Development Director, Research and Production Company “OgneHimZashita” LLC, Saint Petersburg, Russian Federation; ORCID: 0000-0001-7774-6212; e-mail: mail@OgneHimZashita.ru

Актуальность исследований уровня осведомленности студентов, проживающих в общежитии, о пожарной безопасности

© В. Д. Тимофеев✉

Горный институт, Северо-Восточный федеральный университет им. М. К. Аммосова
(Россия, 677000, г. Якутск, ул. Кулаковского, 50)

РЕЗЮМЕ

Введение. Соблюдение норм и правил пожарной безопасности в общежитиях образовательных учреждений требует ответственного отношения администрации и высокого уровня осведомленности студентов. Студентам, живущим в общежитиях, необходимо знать правила поведения в случае возникновения пожара. Подобные объекты потенциально являются источниками повышенного риска возникновения возгораний. Для их профилактики необходимо изучить состояние пожарной безопасности объекта и выявить проблемные вопросы в его обеспечении.

Цели и задачи. На основе обзора исследований по данной проблеме выявлена необходимость повышения культуры безопасности среди студентов. Полученные результаты подтверждены в ходе исследования. Культура безопасности студентов напрямую влияет на пожарные риски. Обоснованием актуальности является необходимость принятия мер, повышающих знания и навыки студентов по предотвращению возгораний. Для решения данной проблемы следует усовершенствовать управление пожарной безопасностью общежитий.

Методы. В работе использовались современные методы определения уровня осведомленности студентов о пожарной безопасности, а также методы обучения и контроля по данному вопросу, что позволит снизить пожарный риск подобных объектов. Для определения осведомленности студентов применялось тестирование, в результате которого были выявлены проблемные вопросы.

Результаты и обсуждение. По результатам исследования выявлено слабое знание студентами основ пожарной безопасности. Даны рекомендации и предложения по совершенствованию обучения мерам пожарной безопасности и контроля за их соблюдением. Все рекомендации оказывают непосредственное влияние на обеспечение пожарной безопасности в общежитии.

Вывод. Необходимо развивать осведомленность студентов о пожарной безопасности для снижения пожарного риска в общежитиях путем использования инструктажей, тренингов, проведения периодических учений и т. д.

Ключевые слова: человеческий фактор; компетентность; анкетирование; пожарный риск; предотвращение пожаров; культура безопасности.

Для цитирования: Тимофеев В. Д. Актуальность исследований уровня осведомленности студентов, проживающих в общежитии, о пожарной безопасности // Пожаровзрывобезопасность/Fire and Explosion Safety. — 2020. — Т. 29, № 1. — С. 69–77. DOI: 10.18322/PVB.2020.29.01.69-77.

✉ Тимофеев Владимир Дмитриевич, e-mail: vd.timofeev@s-vfu.ru

Relevance of studies of the level of awareness of students on fire safety living in dormitories

© Vladimir D. Timofeev✉

Mining Institute, M. K. Ammosov North-Eastern Federal University
(Kulakovskogo St., 50, Yakutsk, 677000, Russian Federation)

ABSTRACT

Introduction. Compliance with fire safety standards and rules in dormitories of educational institutions requires responsible management and a high level of student awareness. Residents of hostels should know the rules of conduct in case of fire. Such facilities are potentially sources of increased risk of fire. To prevent them, it is necessary to study the state of fire safety and identify problematic issues in its provision.

Aims and purposes. Based on a review of analogues, the need was identified to improve the safety culture among students. The results obtained are confirmed during the study. Student safety culture directly affects the fire risk. The relevance of the study lies in the need to take measures to increase the knowledge and skills of students about measures to prevent fires. To solve this problem, it is necessary to improve the fire safety management of dormitories.

Methods. The use of modern methods for determining students' awareness of fire safety, as well as training and monitoring methods on this issue will reduce the fire risk of such objects. To determine the level of students' awareness, testing was used, as a result of which problematic issues were identified.

Results and discussion. According to the results of the study, a weak knowledge of students about the basics of fire safety was revealed. Based on the results of the study, recommendations and suggestions for improving training and control are given. All recommendations have a direct impact on ensuring fire safety in the hostel.

Conclusion. It is necessary to develop students' awareness of fire safety in order to reduce fire risk in dormitories, using briefings, trainings, periodic exercises, etc.

For citation: V. D. Timofeev. Relevance of studies of the level of awareness of students on fire safety living in dormitories. *Pozharovzryvobezopasnost/Fire and Explosion Safety*, 2020, vol. 29, no. 1, pp. 69–77 (in Russian). DOI: 10.18322/PVB.2020.29.01.69-77.

Keywords: human factor; competence; questioning; fire risk; fire prevention; safety culture.

✉ Vladimir Dmitrievich Timofeev, e-mail: vd.timofeev@s-vfu.ru

Введение

Обеспечение безопасности жизни и здоровья не только работников, но и учащихся является главной задачей объектов образовательных учреждений. В деятельности вузов большую роль играет оценка пожарной безопасности. При этом особое внимание уделяется безопасности студентов, проживающих в общежитиях.

Ключевой задачей в обеспечении пожарной безопасности является предотвращение пожаров и организация пожарной профилактики среди персонала учебных заведений и учащихся. Общежития образовательных учреждений в плане пожарной безопасности имеют свой определенный статус. Это связано с тем, что подобные объекты являются местами массового круглосуточного пребывания людей.

В общежитиях практически всегда находится значительное количество людей. В случае пожара, особенно в ночное время, это может привести к большому числу жертв. В связи с этим при изучении пожарной безопасности в общежитиях учебных заведений особое внимание со стороны администрации учреждений и надзорных органов уделяется соблюдению требований пожарной безопасности.

Пожары в общежитиях наносят большой урон государству. Так, например, в Российской Федерации за последние 15 лет при пожарах в общежитиях погибло 75 чел., пострадало 347 чел. [1, 2]. Почему это происходит? Что нужно делать, чтобы защитить общежития от пожаров?

Снижение пожарного риска в зданиях с массовым пребыванием людей до установленного нормативными документами уровня является индикатором и характеристикой эффективности решений, принимаемых администрацией [3].

Комплексная безопасность образовательного учреждения — это состояние его защищенности от реальных и прогнозируемых угроз, в том числе от пожаров, которое реализуется как организация пожарной безопасности данного объекта [4].

Для эффективной деятельности современного вуза необходимо обеспечить все виды безопасности, в том числе пожарную. Основной целью статьи является снижение риска возникновения пожаров,

аварийных ситуаций, травматизма, гибели студентов и сотрудников организации.

Обзор литературных источников

Объекты образовательных учреждений в системе безопасности относятся к объектам повышенной опасности. В соответствии со ст. 32 Федерального закона РФ “Об образовании в Российской Федерации” (№ 273-ФЗ от 29.12.2012 (с изм. 2019 г.)) образовательные организации должны создавать условия, обеспечивающие безопасность и отсутствие угрозы жизни и здоровью работников и учащихся. Соблюдение норм и требований безопасности является составной частью системы безопасности учреждения. К обязательным требованиям относится наличие в учреждении документов, регламентирующих правила и требования пожарной безопасности с учетом специфики организации. В основном в таких организациях адаптируются правила пожарной безопасности ППБ-С 1983 (Правила пожарной безопасности при эксплуатации зданий и сооружений учебных заведений, предприятий, учреждений и организаций системы Минвуза СССР). В подобных учреждениях для предотвращения пожаров проводятся все виды инструктажей: по требованиям пожарной безопасности, по использованию средств противопожарной защиты, по практическим действиям во время возникновения возгорания [5].

В современном мире увеличение функциональности зданий и сооружений, в том числе объектов с массовым пребыванием, приводит к росту числа людей, находящихся на них постоянно или посещающих их. К таким объектам относятся и образовательные учреждения. В местах массового пребывания людей, наряду с высоким риском возникновения пожаров, повышается трудоемкость и сложность их тушения. В связи с этим встает вопрос о необходимости совершенствования решений в системе обеспечения пожарной безопасности вообще и объектов с массовым пребыванием в частности. Первоочередной задачей в подобных случаях является предотвращение пожара или чрезвычайной ситуации. При пожарах основным поражающим фактором, приводящим к гибели людей, считается отравление токсичными газами и ядовитыми веществами [6].

Система обеспечения пожарной безопасности образовательных учреждений — это не только противоподымная защита, системы пожаротушения и сигнализации, пожарная устойчивость зданий, но и предотвращение возгораний и управление возможными рисками [7].

Управление пожарной безопасностью сочетает в себе различные мероприятия по предотвращению пожара: обучение персонала, обеспечение всех путей эвакуации. В программу пожарной безопасности включаются: проверки наличия средств пожаротушения, обучение и тренинги по эвакуации, пожаротушение, взаимодействие с аварийными службами, оценка пожарного риска, пожарная профилактика, отчеты и ведение учета, коммуникации. Программа должна быть комплексной. Отсутствие какого-либо элемента в системе может привести к повышению пожарного риска [7].

Студенты, живущие в общежитии, должны быть уверены, что в здании установлена противопожарная система. Важно также, чтобы они умели различать работу системы в режиме дежурства и в случае возгорания [8].

Пожарная безопасность общежитий является составной частью системы безопасности образовательных учреждений. Она выполняет важную социальную роль в сохранении жизни и здоровья подрастающего поколения — студентов вузов и техникумов. Уровень управления пожарной безопасностью в таких организациях должен постоянно совершенствоваться и обновляться по всем направлениям.

Обеспечение высокого уровня пожарной безопасности в общежитиях зависит от многих факторов, но по статистике первое место занимает человеческий фактор. Поэтому от компетентности студентов в вопросах пожарной безопасности и правил поведения во многом зависит уровень пожарного риска в общежитиях. Повышение уровня осведомленности и компетентности студентов различными способами будет благотворно влиять на общее состояние пожарной безопасности.

Развитию пожара способствуют следующие факторы: задержка передачи сообщения о пожаре персоналом; превышение нормативного времени приезда пожарных на объект; отсутствие персонала на объекте пожара или неисправность автоматической пожарной сигнализации. В образовательном учреждении должны проводиться следующие мероприятия:

1) обеспечение выполнения правил пожарной безопасности, осуществление контроля за соблюдением противопожарного режима всеми работниками и учащимися;

2) организация обучения правилам пожарной безопасности и противопожарного инструктажа для всех работников учреждения;

3) организация добровольных пожарных дружин;

4) обеспечение планов эвакуации, порядка оповещения, установление обязанностей и действий работников учреждения при возникновении пожара;

5) поддержание в исправном состоянии систем и средств противопожарной защиты;

6) проведение противопожарной пропаганды и обучение работников мерам пожарной безопасности.

Помимо типичных нарушений, которые выявляются в ходе проверок образовательных учреждений органами государственного пожарного надзора, можно выделить неэффективное обучение и инструктирование работников и учащихся по мерам пожарной безопасности. Отсутствие навыков безопасного поведения во время пожара является частой причиной летальных исходов [6].

При обеспечении комплексной безопасности образовательных учреждений нужно уделять внимание: обеспечению индивидуальной безопасности личности путем формирования навыков безопасного поведения в опасных ситуациях; эффективной организации коллективной безопасности, создающей условия для безопасной жизнедеятельности.

Обеспечение безопасности образовательных учреждений зависит от оснащения их современной системой безопасности. Человеческий фактор также является одним из главных критериев безопасности. Он характеризует грамотность и компетентность ответственных лиц, отвечающих за безопасность и подготовленность учащихся к действиям в условиях ЧС.

К усложнению обеспечения пожарной безопасности в образовательных учреждениях приводят не соответствующие их специфике требования нормативных документов, например такое, как обеспечение автоматического выключения системы оповещения о пожаре. Дело в том, что при несанкционированном отключении такой системы персонал, не имея обычно навыков его ручного включения, своевременно не оповещает об этом пожарную охрану. В связи с этим возникают трудности по эвакуации и защите людей при ЧС. Системы безопасности образовательных учреждений должны основываться на организационно-техническом аспекте с дополнением возможности подготовки сотрудников и учащихся по безопасному поведению в случае различных чрезвычайных ситуаций, включая пожары [9].

При обеспечении пожарной безопасности в образовательных учреждениях обязательным является обучение учащихся и работников мерам пожарной безопасности. Обучение работников должно проходить в соответствии с п. 3 Правил противопо-

жарного режима в Российской Федерации (Постановление Правительства РФ от 25.04.2012 № 390 (в ред. от 06.04.2016, с изм. от 17.10.2016)).

В “Основах единой государственной политики Российской Федерации в области ГО на период до 2020 г.” (утвержденных Президентом РФ 03.09.2011) установлено направление подготовки населения к действиям при ЧС, которое предполагает проведение специальных учебных тренировок. Для образовательных учреждений объектовые тренировки являются необходимым средством, обеспечивающим комплексную безопасность. В ходе этих тренировок отрабатываются практические навыки по использованию защитных средств, поддержанию дисциплины, организации действий добровольных пожарных расчетов. Мероприятия носят дидактический принцип мультипликативного формирования профессиональных компетенций социально-безопасной личности обучаемого [10].

За рубежом уделяется серьезное внимание совершенствованию пожарной безопасности студенческих общежитий [11–17].

По результатам анкетирования обитателей студенческих общежитий выявлено, что часто в помещениях возникают проблемы, связанные с электрооборудованием, системами водоснабжения, пассивным отношением учащихся и администрации к улучшению бытовых условий и коммунального обслуживания. Делаются выводы о необходимости повышения внимания к системам предотвращения пожаров, планам эвакуации, регулярному техническому обслуживанию коммунальных систем и электрооборудования, улучшению бытовых условий. Система управления пожарной безопасностью общежития при принятии таких мер может снизить пожарный риск в зданиях [11].

Доля общежитий в исследованиях состояния пожарной безопасности жилых зданий и сооружений очень невелика, да и со стороны пожарных служб им уделяется мало внимания. Хотя в таких зданиях требуют особого внимания массовое пребывание студентов, электрические системы здания, системы автоматического пожаротушения и пути эвакуации [12].

Руководство гостиниц и общежитий должно иметь разработанные, принятые и обновленные планы по готовности персонала и проживающих в них людей к действиям в чрезвычайных ситуациях. В таких планах должны быть отражены мероприятия по выделению необходимых ресурсов и проведению эффективного обучения для минимизации потерь и смягчения последствий ЧС, в том числе пожаров. Планы могут быть комплексными и включать в себя организацию управления персоналом или жильцами. В планах должны быть включены действия и

процедуры, направленные на снижение пожарного риска и обеспечение безопасности людей, находящихся в таких зданиях [14, 16].

Изучение осведомленности о пожарной безопасности персонала и людей, находящихся в местах массового пребывания, показало ее низкий уровень. Для совершенствования знаний о пожарной безопасности необходимо применять наиболее эффективные методы через вовлечение в программы безопасности персонала, жильцов и посетителей и распространение среди них печатных материалов, в которых освещаются данные проблемы [15].

В Китае к основным причинам пожаров в общежитиях университетов можно отнести: недостаток знаний студентов о пожарной безопасности; недостаточное осознание опасности; высокую плотность проживания и низкий уровень огнестойкости зданий. К сожалению, китайские студенты практически не осведомлены о пожарах и не владеют навыками спасения. Для снижения пожарного риска необходимо совершенствовать средства пожаротушения и обучать студентов технике безопасности с помощью эвакуационных тренировок. Для обучения по вопросам пожарной безопасности применяют различные методы: лекции, практические занятия, рекламные акции и т. д. [16].

Уровень осведомленности студентов колледжей о безопасности можно определить путем анкетирования. Культура безопасности и научные исследования могут обеспечить безопасную среду для преподавателей и студентов, проживающих в кампусе. Механизм обучения безопасности заключается в создании специализированных курсов по защите и самоспасению в опасных ситуациях. Обязательными являются учения о пожаре и эвакуации. С помощью организованных конкурсов можно выявить знания о безопасности по месту проживания в случае пожаров или стихийных бедствий и умение оказывать первую медицинскую помощь при ЧС [17].

Другие иностранные исследователи [8] по данной проблеме констатируют, что знания о безопасности могут сохранить жизнь при пожаре. Если человек владеет приемами и способами пожаротушения, он сможет устранить начавшееся возгорание. Студент должен знать о личной безопасности, иначе его жизнь в случае ЧС будет зависеть от других. Осведомленность можно повышать на занятиях, и эти знания будут ценными для них [8].

В отечественных учебных заведениях студенты овладевают знаниями и умениями в области безопасности на специальных курсах в пределах программ общепрофессиональных дисциплин. Целью этих программ является формирование личности безопасного типа поведения. К таким дисциплинам относят “Основы безопасности жизнедеятельности” и

“Безопасность жизнедеятельности”. Активное формирование личности происходит в возрасте от 7 до 18 лет. Этот период является особенно чувствительным для формирования личности безопасного типа [18].

В повышении уровня осведомленности студентов важную роль играет изучение дисциплины “Безопасность жизнедеятельности”, в которую включены вопросы пожарной безопасности. Учебный курс способствует повышению уровня знаний по данной тематике [19].

Внеучебная воспитательная работа со студентами оказывает сильное влияние на подготовку студентов и формирование гражданской позиции, сохранение и приумножение нравственных, культурных и гуманитарных ценностей. В этом направлении необходимо проводить воспитательную работу в общежитиях. Профилактика пожаров и обеспечение пожарной безопасности повышают уровень подготовки студентов и степень безопасности в общежитии [20].

При обеспечении комплексной безопасности образовательных учреждений нужно уделять внимание: 1) обеспечению индивидуальной безопасности личности за счет формирования навыков безопасного поведения в опасных ситуациях; 2) эффективной организации коллективной безопасности, создающей условия для безопасной жизнедеятельности. Обеспечение безопасности образовательного учреждения зависит от оснащения его современной системой безопасности и человеческого фактора — грамотности и компетентности ответственных лиц, отвечающих за безопасность и подготовленность учащихся к действиям в условиях ЧС [21].

Таким образом, для снижения пожарного риска в общежитиях необходим комплексный подход, который учитывает также человеческий фактор. Одним из путей достижения такой цели является обучение студентов с помощью различных методик. Это позволяет повысить компетентность студентов, проживающих в общежитиях, в вопросах пожарной безопасности.

Выбор метода

На пожарную безопасность общежитий образовательных учреждений оказывает влияние компетентность студентов в этой сфере. К сожалению, этот фактор не всегда контролируется заинтересованными органами.

В результате обзора исследований по обеспечению пожарной безопасности в общежитиях образовательных учреждений выявлена неэффективность существующих методов. Во многих работах отмечено, что для снижения пожарного риска необходимо повышать уровень осведомленности (компетенций) и культуры безопасности среди студентов.

Для решения данного вопроса необходимо определить уровень знаний студентов в этом направлении. Контроль необходимых обучающих методик является ключевым в рассматриваемой проблеме.

Для контроля знаний и умений (осведомленности) предлагается применять тестирование с вопросами о способах тушения возгораний, о знании местоположения эвакуационных выходов, об умении определить тип пожара.

Тестирование — это один из методов определения качества процесса. Такой способ применяется в здравоохранении (для определения состояния здоровья больного), на производстве (для оценки профессиональной пригодности работников), в системе образования (для определения уровня полученных знаний, навыков и умений слушателями).

Тестирование — это универсальный метод, с помощью которого можно проверить компетенции студентов на различных этапах обучения. Такой способ по сравнению с другими видами наиболее полно соответствует требованиям к контролю процесса обучения.

В современных условиях применяются две разновидности тестирования — обычное (на бумажном носителе) и электронное (с помощью электронных гаджетов). Основное различие этих видов состоит в обработке полученных результатов. Электронное тестирование пользуется огромной популярностью среди студентов, ведь результаты можно получить в короткий срок [22].

Результаты тестирования

В опросе приняли участие студенты, проживающие в общежитии. Общие сведения об участниках опроса представлены в табл. 1.

Анкета состояла из пяти вопросов:

1. С Вами проводили инструктаж по пожарной безопасности после заселения в общежитие?

Таблица 1. Общие сведения об участниках опроса

Table 1. General information about survey participants

Состав респондентов Composition of respondents	Количество Amount	
	чел. people	%
Общее количество / Total amount	231	100,0
Из них студенты / Of these, students:		
мужского пола / male	178	77,0
женского пола / female	53	23,0
1-го курса / 1 st course	52	22,5
2-го курса / 2 nd course	67	29,0
3-го курса / 3 rd course	40	17,3
4-го курса / 4 th course	37	16,0
5-го курса / 5 th course	35	15,1

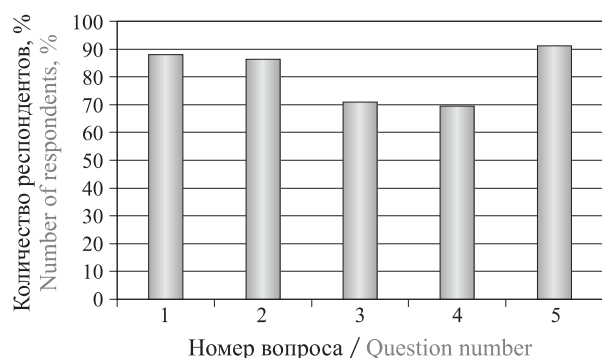


Рис. 1. Диаграмма количества респондентов, давших правильные ответы на вопросы анкеты

Fig. 1. Number of respondents who gave the correct answers to the questionnaire

Таблица 2. Число респондентов, давших правильные ответы
Table 2. Number of respondents giving correct answers

Номер вопроса Question Number	1	2	3	4	5
Количество правильных ответов, % The number of correct answers, %	88	86,2	71	69,4	91

2. Для проверки качества проводимого инструктажа был задан вопрос: Сколько в вашем общежитии эвакуационных выходов?

3. Вы принимали участие в учебной эвакуации в общежитии?

4. Как определить, что за закрытой дверью пожар?

5. При обнаружении пожара по какому номеру звонить?

Таким образом, осведомленность о правилах и требованиях пожарной безопасности студентов, живущих в общежитиях, можно оценивать в целом как положительную (см. табл. 2 и 3, рис. 1 и 2). Лишь небольшой процент студентов не обладает знаниями и навыками поведения в случае возникновения возгораний. Исходя из полученных результатов, можно сделать вывод о необходимости проведения и совершенствования занятий по дисциплине “Безопасность жизнедеятельности”.

В целях обеспечения пожарной безопасности в образовательных учреждениях для предупреждения и тушения пожаров, наряду с соблюдением требований правил пожарной безопасности, должно осуществляться обязательное обучение учащихся и работников мерам пожарной безопасности [23].

В ходе занятий следует акцентировать внимание на практических действиях и прорабатывать навыки поведения при пожаре. Для дальнейшего контроля полученных компетенций мы рекомендуем проводить тестирование по вопросам пожарной безопасности при заселении в общежитие. Особое значе-

Таблица 3. Уровень осведомленности студентов разных курсов
Table 3. Student awareness by course

Номер вопроса Question Number	Число осведомленных студентов, %, в общем количестве по курсам, чел. The number of knowledgeable students, %, in the total number of courses, people				
	1-й / 1 st	2-й / 2 nd	3-й / 3 rd	4-й / 4 th	5-й / 5 th
	52	67	40	37	35
1	90,3	85,03	85,0	94,5	88,5
2	55,7	92,5	90,0	100	100
3	73,0	67,1	90,0	78,3	45,7
4	55,7	68,6	60,0	86,4	82,8
5	80,7	89,5	92,5	100	97,1

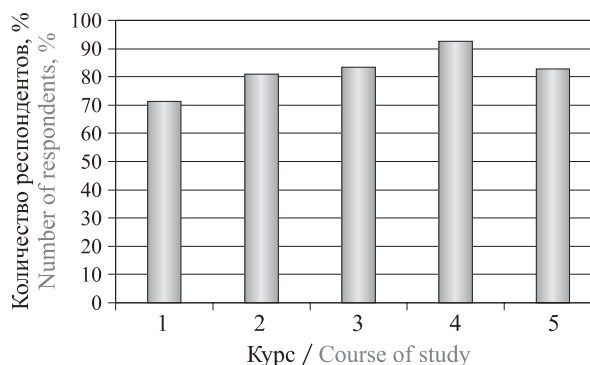


Рис. 2. Уровень осведомленности студентов разных курсов
Fig. 2. Student awareness courses

ние должно уделяться проведению учебных тренировок, которые позволяют отработать знания и навыки поведения при пожаре на практике.

Выводы

Особое место в обеспечении пожарной безопасности общежитий образовательных учреждений занимают знания и навыки по предотвращению пожаров. Безопасное поведение в случае возникновения возгорания также является ключевым вопросом в обучении пожарной безопасности. По результатам исследования установлено, что часть студентов, проживающих на таких объектах, имеют слабое представление о предупреждении возникновения пожаров и не знают, как действовать в случае пожара в помещении. Это может привести к трагическим случаям в условиях реального пожара. Для обеспечения необходимого уровня соблюдения правил и норм пожарной безопасности необходимо принимать организационные и воспитательные меры в отношении администрации и студентов в целях развития у студентов знаний в области пожарной безопасности и навыков поведения в случае возникновения пожара.

Такой подход изменит в лучшую сторону состояние пожарной безопасности образовательных учреждений и снизит пожарные риски на таких объек-

тах. В дальнейшем целесообразно провести исследование по совершенствованию методик обучения

студентов и контроля за соблюдением правил пожарной безопасности.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Крупные пожары в общежитиях вузов России в 2003–2015 годах. URL: <https://ria.ru/20150423/1060390176.html> (дата обращения: 12.11.2019).
2. Крупные пожары в общежитиях в 2013–2017 годах. URL: <https://ria.ru/20171114/1508770865.html> (дата обращения: 12.11.2019).
3. Сметанкина Г. И., Романченко С. А. Актуальные проблемы обеспечения пожарной безопасности общественных зданий // Современные технологии обеспечения гражданской обороны и ликвидации последствий чрезвычайных ситуаций. — 2016. — № 1(7), Т. 1. — С. 274–278.
4. Загребина Е. И. К вопросу комплексной безопасности образовательных организаций // Казанский педагогический журнал. — 2015. — № 1. — С. 97–102.
5. Дрягин В. А. Пожарная безопасность в системе образования // Вестник Шадринского государственного педагогического университета. — 2017. — № 4(36). — С. 20–23.
6. Загребина Е. И. Вопросы обеспечения пожарной безопасности в образовательных учреждениях // Вестник НЦБЖД. — 2014. — № 4(22). — С. 119–125.
7. Nadzim N., Taib M. Appraisal of fire safety management systems at educational buildings // SHS Web of Conferences. — 2014. — Vol. 11. — Article No. 01005. — 7 p. DOI: 10.1051/shsconf/20141101005.
8. Ismail I., Taib M. Assessment of fire protection system in student accommodation at Universiti Sains Malaysia (USM) main campus // Proceedings of the Building Surveying and Technology Undergraduate Conference 2013. — Penang, Malaysia : School of Housing, Building and Planning, Universiti Sains Malaysia, 2013. — P. 98–104.
9. Радоуцкий В. Ю., Павленко А. В., Гревцев М. В. Обоснование комплексной безопасности высшего учебного заведения // Инновационная наука. — 2015. — № 11-2. — С. 108–110.
10. Сергеев Г. Г. Объектовые тренировки в образовательном учреждении как дидактический инструмент формирования культуры безопасности жизнедеятельности учащихся // Пожарная безопасность: проблемы и перспективы. — 2015. — Т. 1, № 1(6). — С. 81–84.
11. Agyekum K., Ayarkwa J., Amoah P. Challenges to fire safety management in multi-storey students' hostels // Modern Management Science & Engineering. — 2016. — Vol. 4, No. 1. — P. 53–61.
12. Arghami S., Kamali K., Mahboubi M. Development of a fire safety checklist for dormitories // Journal of Human, Environment and Health Promotion. — 2016. — Vol. 2, No. 1. — P. 20–31. DOI: 10.29252/jhehp.2.1.20.
13. AlBattat A. R., Mat Som A. P. Emergency preparedness for disasters and crises in the hotel industry // SAGE Open. — 2013. — Vol. 3, No. 3. — 10 p. DOI: 10.1177/2158244013505604.
14. Rahim N. A., Taib M., Mydin M. A. O. Investigation of fire safety awareness and management in mall // MATEC Web of Conferences. — 2014. — Vol. 10. — Article No. 06004. — 5 p. DOI: 10.1051/matecconf/20141006004.
15. Wong K. H.-L., Xie D.-Y. Fire safety management strategy of complex developments // Procedia Engineering. — 2014. — Vol. 71. — P. 410–420. DOI: 10.1016/j.proeng.2014.04.059.
16. Yijun S., Chunying L. Research on fire risk assessment and safety management of college students' dormitory // Proceedings of the 14th International Conference on Innovation & Management / Wang Aimin (ed.). — Wuhan : Wuhan University of Technology Press, 2017. — P. 642–646.
17. Li J., Mei D., Cheng Y., Chen W., Cheng Z. Status investigation and construction strategy of college students' safety culture // Proceedings of the 7th International Conference on Education, Management, Computer and Society (EMCS 2017). — Atlantis Press, 2017. — P. 204–209. DOI: 10.2991/emcs-17.2017.41.
18. Беликов К. Н. Формирование личности безопасного типа поведения в контексте внедрения новых образовательных стандартов // Педагогика безопасности: наука и образование : материалы Международной научной конференции (г. Екатеринбург, 18 декабря 2015 г.) / В. В. Гафнер, А. Н. Павлова (ред.). — Екатеринбург : УрГПУ, 2015. — С. 38–41.
19. Рудов Ю. Н., Завьялова Я. Л. Состояние пожарной безопасности в Новосибирском государственном педагогическом университете // Грани педагогики безопасности : материалы Всероссийской научной студенческой конференции с международным участием (Екатеринбург, 11 декабря 2015 г.) / В. В. Гафнер, А. Н. Павлова (ред.). — Екатеринбург : УрГПУ, 2015. — С. 163–166.
20. Любин А. В. Воспитательная работа в студенческом общежитии // История и педагогика естествознания. — 2017. — № 1. — С. 44–46.

21. Аветисянц Г. Г. Актуальные проблемы обеспечения комплексной безопасности образовательных организаций // Конференциум АСОУ : сборник научных трудов и материалов научно-практических конференций. — 2015. — № 1. — С. 206–209.
22. Овчаренков Э. А. Методика применения тестирования как одного из видов контроля и проверки знаний студентов вузов // Современные проблемы науки и образования. — 2014. — № 5. — 8 с.
23. Роговая А. В. Мониторинг организационно-правовых основ регулирования комплексной безопасности образовательных организаций в Российской Федерации // Мониторинг правоприменения. — 2017. — № 2(23). — С. 50–58. DOI: 10.21681/2412-8163-2017-2-50-58.

REFERENCES

1. *Large fires in hostels of Russian universities in 2003–2015* (in Russian). Available at: <https://ria.ru/20150423/1060390176.html> (Accessed 12 November 2019).
2. *Large fires in dormitories in 2013–2017* (in Russian). Available at: <https://ria.ru/20171114/1508770865.html> (Accessed 12 November 2019).
3. G. I. Smetankina, S. A. Romanchenko. Actual problems of ensuring fire safety of public buildings. *Sovremennyye tekhnologii obespecheniya grazhdanskoj oborony i likvidatsii posledstviy chrezvychaynykh situatsiy / Modern Technologies for Ensuring Civil Defense and Emergency Response*, 2016, no. 1(7), vol. 1, pp. 274–278 (in Russian).
4. E. I. Zagrebina. To integrated safety of educational organizations. *Kazanskiy pedagogicheskiy zhurnal / Kazan Pedagogical Journal*, 2015, no. 1, pp. 97–102 (in Russian).
5. V. A. Dryagin. Fire safety in the education system. *Vestnik Shadrinskogo gosudarstvennogo pedagogicheskogo universiteta / Journal of Shadrinsk State Pedagogical University*, 2017, no. 4(36), pp. 20–23 (in Russian).
6. E. I. Zagrebina. Questions of ensuring fire safety in educational institutions. *Vestnik NTsBZhD / Vestnik of Scientific Center for Life Safety*, 2014, no. 4(22), pp. 119–125 (in Russian).
7. N. Nadzim, M. Taib. Appraisal of fire safety management systems at educational buildings. *SHS Web of Conferences*, 2014, vol. 11, article no. 01005. 7 p. DOI: 10.1051/shsconf/20141101005.
8. I. Ismail, M. Taib. Assessment of fire protection system in student accommodation at Universiti Sains Malaysia (USM) main campus. In: *Proceedings of the Building Surveying and Technology Undergraduate Conference 2013*. Penang, Malaysia, School of Housing, Building and Planning, Universiti Sains Malaysia, 2013, pp. 98–104.
9. V. Yu. Radoutskiy, A. V. Pavlenko, M. V. Grevtsev. Justification of the integrated security of a higher educational institution. *Innovatsionnaya nauka / Innovation Science*, 2015, no. 11–2, pp. 108–110 (in Russian).
10. G. G. Sergeev. Object training in an educational institution as a didactic tool for the formation of a safety culture for students. *Pozharnaya bezopasnost: problemy i perspektivy / Fire Safety: Problems and Prospects*, 2015, vol. 1, no. 1(6), pp. 81–84 (in Russian).
11. K. Agyekum, J. Ayarkwa, P. Amoah. Challenges to fire safety management in multi-storey students' hostels. *Modern Management Science & Engineering*, 2016, vol. 4, no. 1, pp. 53–61.
12. S. Arghami, K. Kamali, M. Mahboubi. Development of a fire safety checklist for dormitories. *Journal of Human, Environment and Health Promotion*, 2016, vol. 2, no. 1, pp. 20–31. DOI: 10.29252/jhehp.2.1.20.
13. A. R. AlBattat, A. P. Mat Som. Emergency preparedness for disasters and crises in the hotel industry. *SAGE Open*, 2013, vol. 3, no. 3. 10 p. DOI: 10.1177/2158244013505604.
14. N. A. Rahim, M. Taib, M. A. O. Mydin. Investigation of fire safety awareness and management in mall. *MATEC Web of Conferences*, 2014, vol. 10, article no. 06004. 5 p. DOI: 10.1051/mateconf/20141006004.
15. K. H.-L. Wong, D.-Y. Xie. Fire safety management strategy of complex developments. *Procedia Engineering*, 2014, vol. 71, pp. 410–420. DOI: 10.1016/j.proeng.2014.04.059.
16. S. Yijun, L. Chunying. Research on fire risk assessment and safety management of college students' dormitory. In: Wang Aimin (ed.). *Proceedings of the 14th International Conference on Innovation & Management*. Wuhan, Wuhan University of Technology Press, 2017, pp. 642–646.
17. J. Li, D. Mei, Y. Cheng, W. Chen, Z. Cheng. Status investigation and construction strategy of college students' safety culture. In: *Proceedings of the 7th International Conference on Education, Management, Computer and Society (EMCS 2017)*. Atlantis Press, 2017, pp. 204–209. DOI: 10.2991/emcs-17.2017.41.

18. K. N. Belikov. The formation of personality safe type of conduct in the context of introduction of new educational standarts. In: V. V. Gafner, A. N. Pavlova (eds.). *Pedagogika bezopasnosti: nauka i obrazovaniye* [Pedagogy Safety: Science and Education]. Materials of the International Scientific Conference (Ekaterinburg, 18 December 2015). Ekaterinburg, Ural State Pedagogical University Publ., 2015, pp. 38–41 (in Russian).
19. Yu. N. Rudov, Ya. L. Zavyalova. State of fire safety at the Novosibirsk State Pedagogical University. In: V. V. Gafner, A. N. Pavlova (eds.). *Grani pedagogiki bezopasnosti* [Facets of safety pedagogy]. Materials of the All-Russian Scientific Student Conference with International Participation (Ekaterinburg, 11 December 2015). Ekaterinburg, Ural State Pedagogical University Publ., 2015, pp. 163–166 (in Russian).
20. A. V. Lyubin. Educational work in a dormitory. *Istoriya i pedagogika yestestvoznaniya / History and Pedagogy of Natural Sciences*, 2017, no. 1, pp. 44–46 (in Russian).
21. G. G. Avetisyants. Actual problems of ensuring the integrated security of educational organizations. *Konferentsium ASOU: sbornik nauchnykh trudov i materialov nauchno-prakticheskikh konferentsiy / ASOU Conference: collection of scientific papers and materials of scientific and practical conferences*, 2015, no. 1, pp. 206–209 (in Russian).
22. E. A. Ovcharenkov. Method of application testing as one of the types of inspection and testing the knowledge of students. *Sovremennyye problemy nauki i obrazovaniya / Modern Problems of Science and Education*, 2014, no. 5. 8 p. (in Russian).
23. A. V. Rogovaia. Monitoring the organisational and legal foundations for regulating the comprehensive security of educational institutions in the Russian Federation. *Monitoring pravoprimeneniya / Monitoring of Law Enforcement*, 2017, no. 2(23), pp. 50–58 (in Russian). DOI: 10.21681/2412-8163-2017-2-50-58.

Поступила 29.12.2019, после доработки 24.01.2020;
принята к публикации 31.01.2020

Received 29 December 2019; Received in revised form 24 January 2020;
Accepted 31 January 2020

Информация об авторе

ТИМОФЕЕВ Владимир Дмитриевич, канд. техн. наук, доцент кафедры “Техносферная безопасность”, Горный институт, Северо-Восточный федеральный университет им. М. К. Аммосова, г. Якутск, Российская Федерация; ORCID 0000-0002-4498-1774; e-mail: vd.timofeev@s-vfu.ru

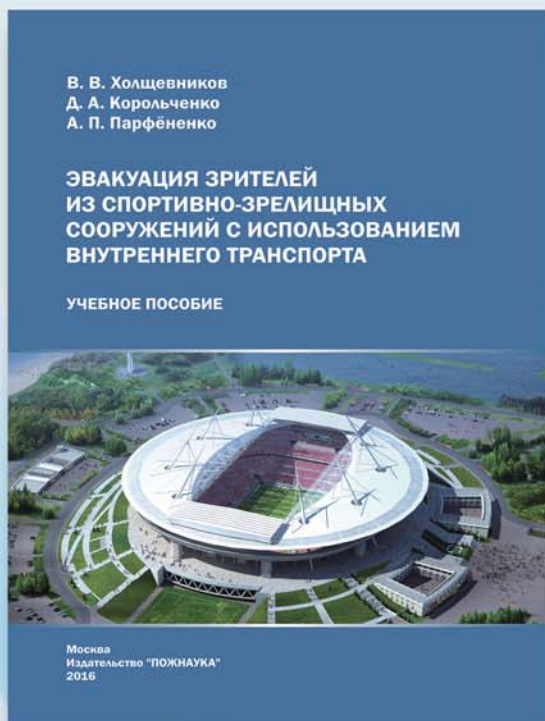
Information about the author

Vladimir D. TIMOFEEV, Cand. Sci. (Eng.), Associate Professor of the Department “Technosphere Safety” Mining Institute, M. K. Ammosov North-Eastern Federal University, Yakutsk, Russian Federation; ORCID 0000-0002-4498-1774; e-mail: vd.timofeev@s-vfu.ru



ООО «Издательство «ПОЖНАУКА»

предлагает Вашему вниманию



Учебное пособие

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

ЭВАКУАЦИЯ ЗРИТЕЛЕЙ ИЗ СПОРТИВНО-ЗРЕЛИЩНЫХ СООРУЖЕНИЙ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ВНУТРЕННЕГО ТРАНСПОРТА

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

121352, Россия, г. Москва, а/я 26
Тел. +7 (495) 228-09-03
E-mail: info@fire-smi.ru

Какова “стоимость” пожаров в современном мире?

© Н. Н. Брушлинский, С. В. Соколов ✉

Академия Государственной противопожарной службы МЧС России
(Россия, 129366, г. Москва, ул. Бориса Галушкина, 4)

РЕЗЮМЕ

В статье приведена информация о “стоимости” пожаров (потерь от пожаров и затрат на борьбу с ними) в различных странах мира в начале XXI в. Представленная оценка “стоимости” пожаров (прямой и косвенный ущерб от пожаров, стоимость содержания противопожарных служб, стоимость систем противопожарной защиты зданий, стоимость содержания систем противопожарного страхования) получена на основе анализа данных Всемирного центра пожарной статистики (ВЦПС) за период 1981–2011 гг. Показано, что в среднем прямой ущерб от пожаров для всех стран оценивается в 0,21 % валового национального продукта (ВНП), косвенный — 0,04 % (в 5 раз меньше прямого). Содержание пожарной охраны составляет 0,16 % ВНП, противопожарная защита зданий — 0,28 % и содержание страховых компаний — 0,11 %. В целом для 20 развитых стран потери от пожаров достигают 0,25 % ВНП, затраты на борьбу с ними — 0,57 % ВНП, т. е. затраты больше потерь почти в 3 раза. В среднем суммарная “стоимость” пожаров в этих 20 странах составляет 0,8 % ВНП. Если к этому добавить социальные потери, связанные с гибелью и травмированием людей, затраты на научные исследования, подготовку кадров для пожарной охраны и т. п., то “стоимость” пожаров достигнет примерно 1–2 % ВНП. Представлена оценка “стоимости” пожаров в США по материалам отчетов Национальной ассоциации противопожарной защиты (NFPA) США. Проведено сравнение данных по “стоимости” пожаров ВЦПС и NFPA. Получены достаточно надежные оценки “стоимости” пожаров в современном мире.

Ключевые слова: статистика пожаров; прямой ущерб; косвенный ущерб; потери от пожаров; затраты на борьбу с пожарами.

Для цитирования: Брушлинский Н. Н., Соколов С. В. Какова “стоимость” пожаров в современном мире? // Пожаровзрывобезопасность/Fire and Explosion Safety. — 2020. — Т. 29, № 1. — С. 79–88. DOI: 10.18322/PVB.2020.29.01.79-88.

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

How much is the fire “cost” in the modern world?

© Nikolay N. Brushlinskiy, Sergey V. Sokolov ✉

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

ABSTRACT

The article provides information on the “cost” of fires (losses from fires and the cost of fighting fires) in different countries of the world at the beginning of the XXI century. The presented assessment of the “cost” of fires (direct losses from fires, indirect losses, fire services expenditures, the cost of fire protection systems of buildings and the cost of fire insurance administration) was obtained based on an analysis of data from the World Fire Statistics Center (WFSC) for the period 1981–2011. It is shown that on average, direct losses from fires for all countries is estimated at 0.21 % of the Gross Domestic Product (GDP), indirect losses — 0.04 % (five times less than direct). The fire services expenditures is 0.16 % of GDP, fire protection of buildings — 0.28 % and cost of insurance administration — 0.11 %. In general, for 20 developed countries fire losses account for 0.25 % of GDP, the cost of fighting them is 0.57 % of GDP, i. e. costs are more than three times the losses. On average, the “cost” of fires in these 20 countries is 0.8 % of GDP. If we add to this the social losses associated with the fire deaths and fire injuries, the costs of research, training for the fire department, etc., then the “cost” of fires will be about 1–2 % of GDP. The presented estimate of the “cost” of fires in the United States based on reports from the National Fire Protection Association (NFPA) of the United States. The data on the “costs” of fires of the WFSC and NFPA are compared. Quite reliable estimates of the “costs” of fires in the modern world have been obtained.

Keywords: fire statistics; direct fire losses; indirect fire losses; fire cost; fire expenditures.

For citation: N. N. Brushlinskiy, S. V. Sokolov. How much is the fire “cost” in the modern world? *Pozharovzryvobezopasnost/Fire and Explosion Safety*, 2020, vol. 29, no. 1, pp. 79–88 (in Russian). DOI: 10.18322/PVB.2020.29.01.79-88.

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

Введение

Для ответа на вопрос, какова “стоимость” пожаров в современном мире, используем данные Всемирного центра пожарной статистики (ВЦПС) [1–7], созданного в 1981 г. при Международной ассоциации страхования экономики. ВЦПС был аккредитован при ООН и занимался изучением “стоимости” пожаров, т. е. общественных потерь от пожаров и затрат на борьбу с ними, но в 2014 г. он, к сожалению, прекратил свое существование.

За период 2001–2011 гг. ВЦПС выпустил 29 отчетов (ежегодных) на английском языке, в которых приводилась информация о “стоимости” пожаров (о прямых и косвенных ущербах от пожаров за год, стоимости содержания противопожарных служб, стоимости систем противопожарной защиты зданий, стоимости содержания систем противопожарного страхования) в 15–20 развитых странах. Однако никакой обобщающей аналитической работы не проводилось [8, 9].

Для удобства и корректности сопоставления этих данных ВЦПС использовались доли валового национального продукта (ВВП) каждой страны, измеряемые в процентах.

Оценка “стоимости” пожаров в странах мира

В нашем исследовании мы прежде всего объединили все данные для 20 стран мира (табл. 1 и рис. 1), а потом разработали метод анализа этих данных (табл. 2). Из 20 стран, перечисленных в табл. 1, 15 находятся в Европе, 3 — в Азии и 2 — в Америке.

Как следует из табл. 1, самый большой прямой ущерб от пожаров в долях от ВВП зафиксирован в Люксембурге и Бельгии; здесь же отмечен и самый крупный косвенный ущерб (который в 3–4 раза меньше прямого ущерба). Содержание пожарной охраны дороже всего обходится Чехии и Японии. Наибольшие затраты несут страны на обеспечение противопожарной защиты зданий, и здесь лидируют Венгрия, Сингапур и Дания. На содержание страховых компаний больше всего денег уходит в Бельгии, Новой Зеландии и Люксембурге (интересно, что именно в Бельгии и Люксембурге страховые компании фиксируют самые крупные ущербы от пожаров).

В среднем прямой ущерб от пожаров для всех стран оценивается в 0,21 % ВВП, косвенный — 0,04 % (в 5 раз меньше прямого). На содержание пожарной охраны тратится 0,16 % ВВП, противопожарную защиту зданий — 0,28 % и содержание страховых компаний — 0,11 % [10–12].

Таблица 1. “Стоимость” пожаров в некоторых странах мира
Table 1. “Cost” of fires in some countries

№ п/п No.	Страна Country	“Стоимость” в долях ВВП, % “Cost” of fire as percentage of GDP, %				
		Прямой ущерб C_1 Direct losses C_1	Косвенный ущерб C_2 Indirect losses C_2	Содержание пожарной охраны C_3 Fire service C_3	Противопожарная защита зданий C_4 Fire protection C_4	Страхование C_5 Fire insurance C_5
1	Бельгия Belgium	0,43	0,113	0,15	0,21	0,26
2	Дания Denmark	0,29	0,048	0,10	0,41	0,12
3	Норвегия Norway	0,33	0,019	0,14	0,33	0,13
4	Люксембург Luxembourg	0,53	0,133	0,09	—	0,17
5	Канада Canada	0,20	0,022	0,26	0,27	0,14
6	Швейцария Switzerland	0,18	0,079	0,11	0,37	0,15
7	США USA	0,18	0,012	0,26	0,33	0,08
8	Велико- британия Great Britain	0,19	0,044	0,25	0,17	0,14
9	Новая Зеландия New Zealand	0,25	—	0,17	0,16	0,21
10	Япония Japan	0,12	0,016	0,31	0,23	0,11
11	Нидерланды Netherlands	0,19	0,031	0,16	0,22	0,15
12	Швеция Sweden	0,23	0,019	0,23	0,16	0,07
13	Сингапур Singapore	0,09	—	0,03	0,55	0,03
14	Венгрия Hungary	0,10	0,09	—	0,56	0,01
15	Чехия Czech	0,09	0,037	0,36	0,18	0,01
16	Италия Italy	0,21	0,015	0,06	0,33	0,06
17	Франция France	0,24	0,043	0,08	0,15	0,12
18	Финляндия Finland	0,19	0,022	0,20	—	0,06
19	Словения Slovenia	0,09	0,016	0,06	0,13	0,08
20	Германия Germany	0,18	0,036	0,07	—	0,08
Среднее Average		0,21	0,045	0,16	0,28	0,11

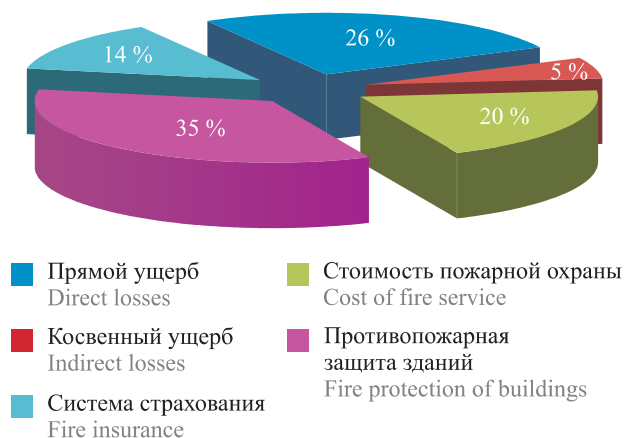


Рис. 1. Распределение компонентов средней "стоимости" пожаров в странах мира

Fig. 1. Distribution of components of average fire "cost" in the countries

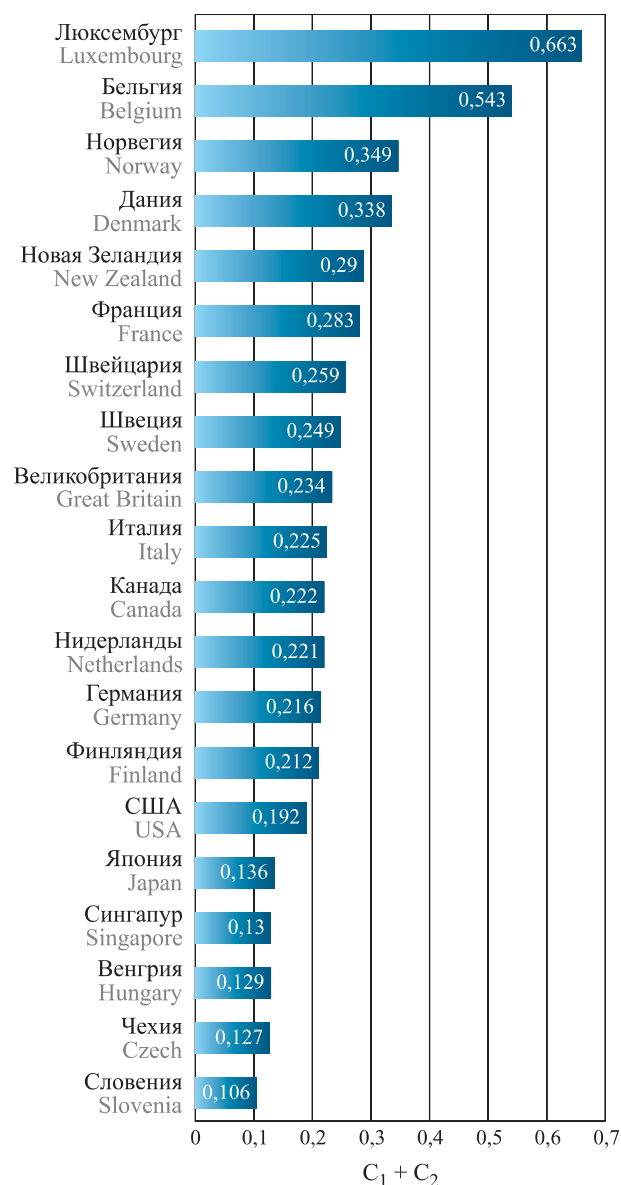


Рис. 2. Потери от пожаров в долях от ВВП, %

Fig. 2. Fire losses as a percentage of GDP

Таблица 2. Потери от пожаров и затраты на борьбу с ними
Table 2. Fire losses and fire costs

№ п/п No.	Страна Country	“Стоимость” в долях ВВП, % “Cost” as percentage of GDP, %			
		Потери Losses $C_1 + C_2$	Затраты Costs $C_3 + C_4 + C_5$	$\sum_{i=1}^5 C_i$	Затраты Costs Потери Losses
1	2	3	4	5	6
1	Бельгия Belgium	0,543	0,63	1,173	1,2
2	Дания Denmark	0,338	0,63	0,968	1,9
3	Норвегия Norway	0,349	0,60	0,949	1,7
4	Люксембург Luxembourg	0,663	0,54	1,203	0,8
5	Канада Canada	0,222	0,67	0,892	3,0
6	Швейцария Switzerland	0,259	0,63	0,889	2,4
7	США USA	0,192	0,67	0,862	3,5
8	Велико- британия Great Britain	0,234	0,56	0,794	2,4
9	Новая Зеландия New Zealand	0,290	0,56	0,850	1,9
10	Япония Japan	0,136	0,64	0,676	4,8
11	Нидерланды Netherlands	0,221	0,53	0,751	2,4
12	Швеция Sweden	0,249	0,46	0,709	1,8
13	Сингапур Singapore	0,130	0,61	0,740	4,7
14	Венгрия Hungary	0,129	0,73	0,859	5,7
15	Чехия Czech	0,127	0,55	0,677	4,3
16	Италия Italy	0,225	0,45	0,675	2,0
17	Франция France	0,283	0,35	0,633	1,2
18	Финляндия Finland	0,212	0,54	0,752	2,5
19	Словения Slovenia	0,106	0,27	0,375	2,5
20	Германия Germany	0,216	0,43	0,646	2,0
Среднее Average		0,256	0,57	0,804	2,38

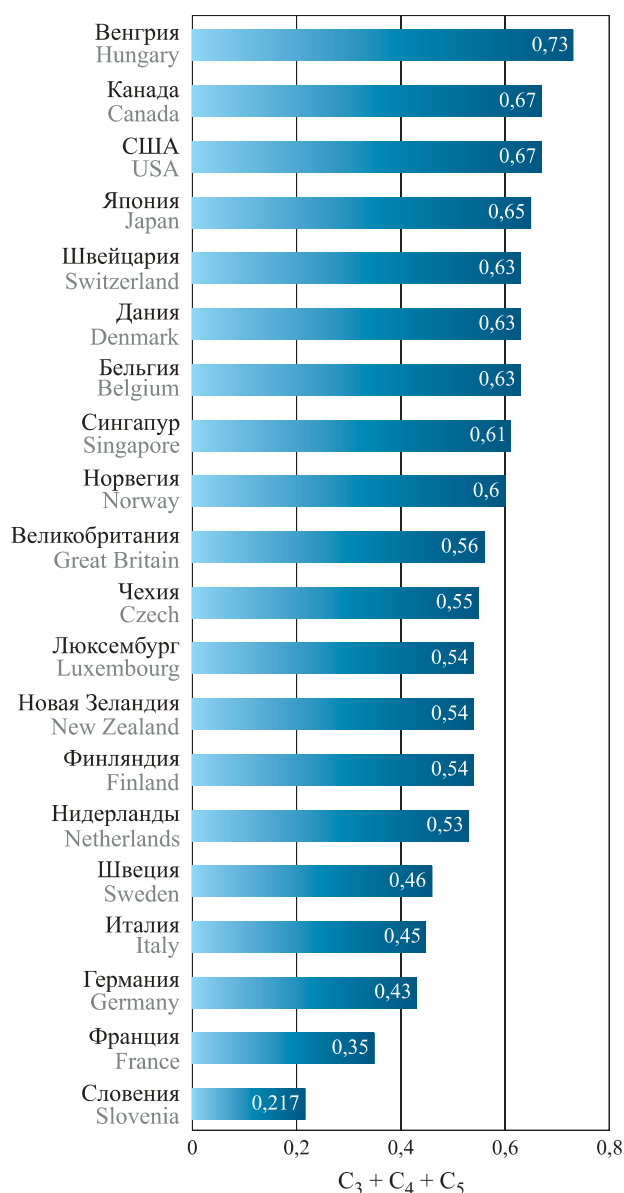


Рис. 3. Затраты на борьбу с пожарами в долях от ВВП, %
Fig. 3. Fire expenditures as a percentage of GDP

Поскольку в табл. 1 некоторые данные отсутствуют (прочерки в ячейках), то мы заменим их средними значениями (нижняя строка табл. 1). В результате обобщения данных табл. 1 имеем табл. 2, которая позволяет получить более содержательную информацию о “стоимости” пожаров.

Для этого целесообразно рассмотреть, во-первых, потери от пожаров как сумму прямого и косвенного ущерба от них ($C_1 + C_2$) и, во-вторых, затраты на борьбу с ними в виде суммы ($C_3 + C_4 + C_5$), а затем изучить соотношение затрат и потерь.

Данные табл. 2 позволяют сделать интересные выводы, которые до сих пор никем не были сформулированы. Например, самые большие потери от пожаров несет Люксембург (0,663 %), но при этом его затраты на борьбу с пожарами существенно меньше,

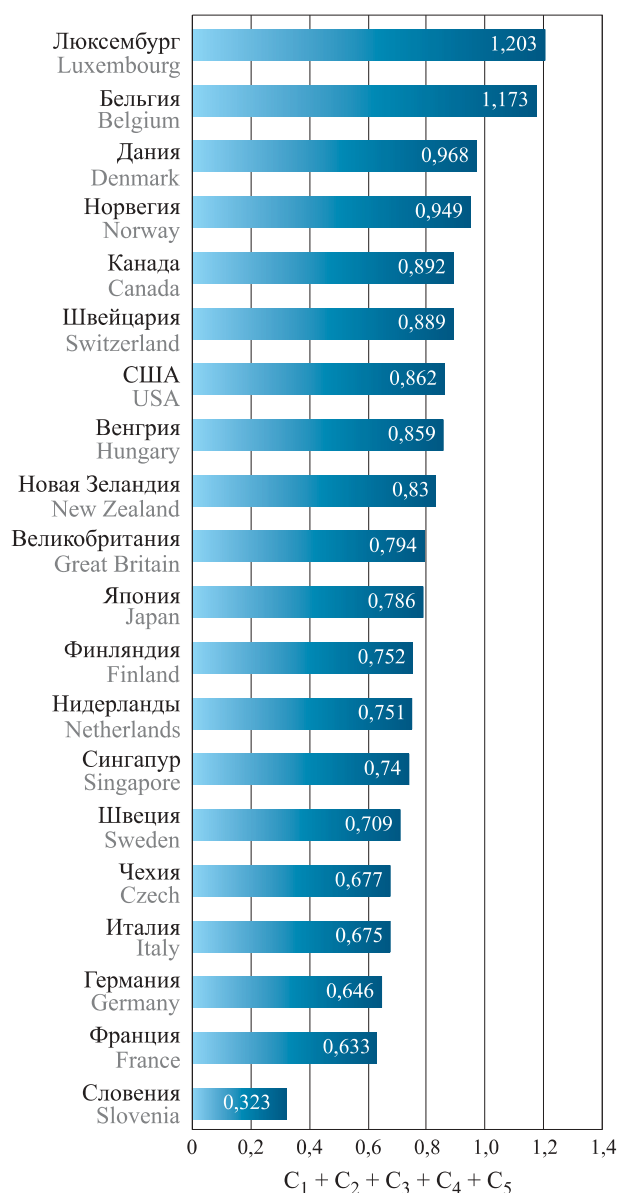


Рис. 4. Суммарные потери и затраты в долях от ВВП, %
Fig. 4. Fire losses and fire expenditures as a percentage of GDP

чем потери от них. Во всех остальных странах затраты превышают потери. В частности, затраты на борьбу с пожарами в Венгрии почти в 6 раз больше, чем потери (см. графу 6 табл. 2), в Японии и Сингапуре — в 5 раз. При этом большая часть затрат приходится на создание систем противопожарной защиты зданий и сооружений. Это следует из табл. 1.

В целом, как мы видим из данных табл. 2 (последняя строка), в среднем для 20 развитых стран потери от пожаров составляют 0,256 % ВВП, затраты на борьбу с ними — 0,57 % ВВП, т. е. затраты больше потерь почти в 3 раза. Для удобства анализа данных дополнительно были построены графики (рис. 2–5).

В среднем сумма “стоимости” пожаров в этих 20 странах составила 0,8 % ВВП. Если к этому добавить социальные потери, связанные с гибелью и

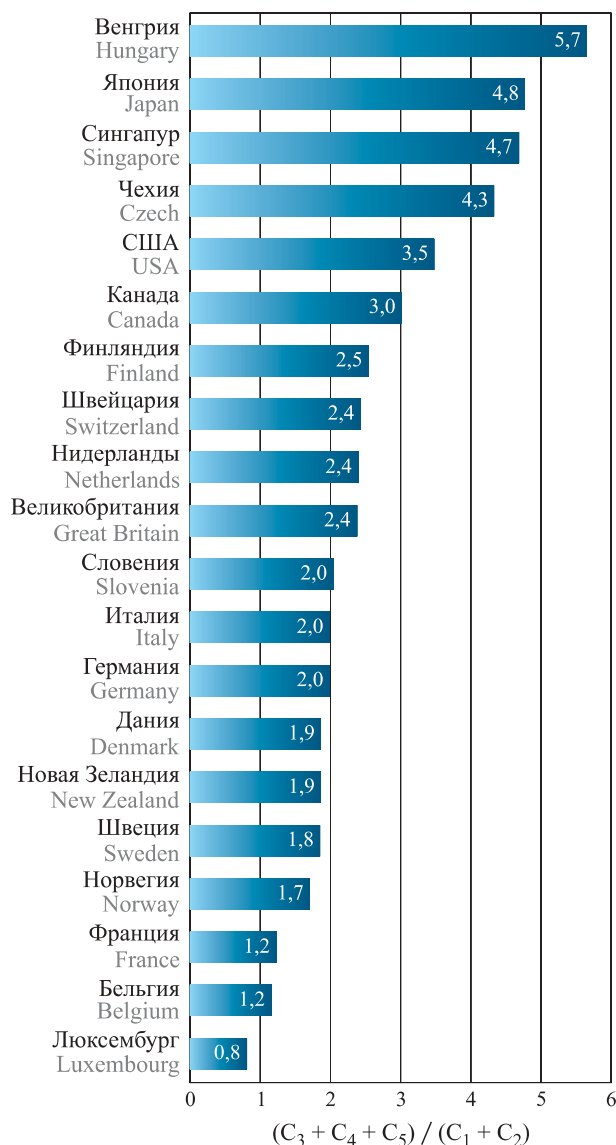


Рис. 5. Отношение затрат к потерям

Fig. 5. Ratio of expenditures to losses

травмированием людей, затраты на научные исследования, подготовку кадров для пожарной охраны и др., то “стоимость” пожаров в современном мире достигнет примерно 1–2 % ВВП (например, в США в 2014 г. эта доля составляла около 2 % от ВВП). Эти результаты мало известны специалистам и должны их заинтересовать [13–15].

Оценка “стоимости” пожаров в США

Однако данные табл. 1 и 2 дают все-таки неполное представление о “стоимости” пожаров в мире. В качестве дополнительного аргумента рассмотрим отчет NFPA (Национальная ассоциация противопожарной защиты США) “Суммарная стоимость пожаров в США в 2014 году”, в котором детально проанализирован этот вопрос [16–20]. Согласно отчету суммарная “стоимость” пожаров в США в

2014 г. составила 328,5 млрд. долл., т. е. 1,9 % ВВП (в 2,4 раза больше, чем в табл. 2).

На наш взгляд, особую ценность в отчете представляет, во-первых, детальный анализ всех компонентов “стоимости” пожаров и, во-вторых, динамика потерь и затрат на борьбу с пожарами в США с 1980 по 2014 гг. Остановимся на этих моментах подробнее.

Сначала рассмотрим общую схему анализа “стоимости” пожаров, принятую в США (рис. 6). Распределение долей компонентов “стоимости” пожаров представлено на рис. 7, на котором насчитывается 14 различных компонентов, входящих в оценку общей “стоимости” пожаров. Тогда, зная все компоненты, можно упростить эту схему (рис. 8).

На схеме мы имеем семь основных компонентов “стоимости” пожаров в США. Из отчета [16] мы видим, что затраты на борьбу с пожарами в США в 2014 г. составили 273,1 млрд. долл., а потери от них — 55,4 млрд. долл. Следовательно, затраты в 4,9 раз были больше, чем потери от пожаров. Детализируя “стоимость” пожаров по основным компонентам, можно сказать, что затраты на “активную” защиту от пожаров составили в 2014 г. 90,1 млрд. долл., на “пассивную” — 159,4 млрд. долл., на страхование от пожаров — 23,6 млрд. долл. Далее, потери от гибели и травмирования людей при пожарах были оценены в 40,4 млрд. долл., имущественные потери — 13,2 млрд. долл. и косвенные потери — 1,9 млрд. долл.

Поскольку нам известно из отчета, что вся “стоимость” пожаров (328,5 млрд. долл.) составила в 2014 г. 1,9 % ВВП, то мы можем оценить в долях ВВП отдельные компоненты этой стоимости. Так, потери от пожаров (прямые и косвенные) составляют 0,32 % ВВП, “активная” защита — 0,52 % ВВП, “пассивная” защита — 0,90 % ВВП и страхование от пожаров — 0,14 % ВВП.

Теперь мы можем сопоставить данные по стоимости пожаров ВЦПС (см. табл. 2) и данные отчета [16]. Для удобства анализа составим табл. 3. Из табл. 3 следует, что ВЦПС учитывал не все компоненты “стоимости” пожаров. В результате этого “стоимость” пожаров по ВЦПС оказалась в 2,2 раза меньше, чем в отчете специалистов из университета Буффало, а затраты превысили потери от пожаров не в 3,5, а почти в 5 раз!

Правда, здесь необходимо сделать одно замечание.

Данные ВЦПС охватывают период 2000–2011 гг., а отчет [16] написан в 2017 г. и детально анализирует “стоимость” пожаров за 2014 г. Вместе в тем, как следует из того же отчета, данные по потерям и затратам очень сильно меняются во времени. В рассматриваемом отчете представлена динамика этих



Рис. 6. Общая схема “стоимости” пожаров в США [16]
Fig. 6. Scheme of fire “cost” in USA [16]

данных за период 1980-2014 гг. В связи с этим рассмотрим этот вопрос подробнее.

На рис. 9 приведена динамика отношения потерь от пожаров к затратам на борьбу с ними в период с 1980 по 2014 гг. Из рис. 9 видно, что если в 1980 г. это отношение составляло 0,93, а в 1981 г. даже 0,94, то в 2013 и 2014 гг. оно снизилось до 0,20.

Эти данные означают, что если в начале 80-х годов потери почти равнялись затратам, то в 2013–2014 гг. они составляли только пятую их часть. Это обусловлено тем, что в США с начала 80-х годов за-

траты на борьбу с пожарами начали быстро расти (рис. 10), что благотворно сказалось на уровне потерь от пожаров. Так, затраты выросли за четверть века в 2,5 раза, а потери сократились в два раза (рис. 11), что и дало пятикратное превышение затрат над потерями в 2014 г.

В результате такой динамики общая “стоимость” пожаров в США выросла с 220 млрд. до 328,5 млрд. долл. (с учетом инфляции), но “стоимость” пожаров в долях ВВП уменьшилась с 7,6 до 1,9 % (в связи с быстрым ростом экономики США) (см. рис. 11).

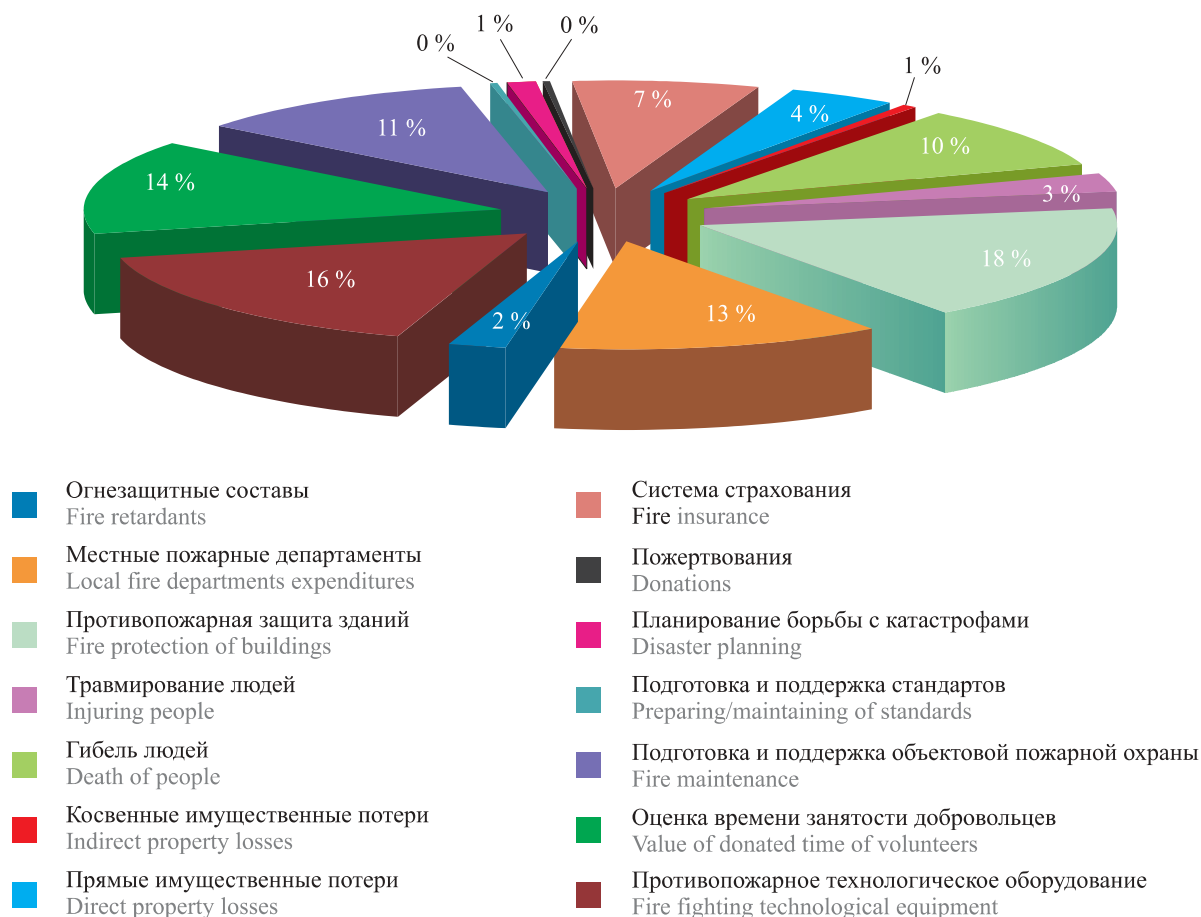


Рис. 7. Распределение долей компонентов “стоимости” пожаров в США [16]

Fig. 7. Distribution of components fire “cost” in USA [16]

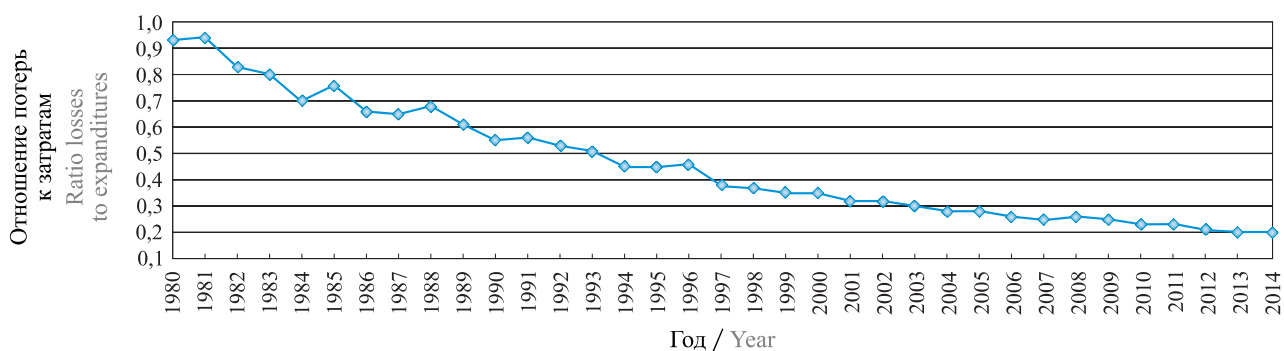
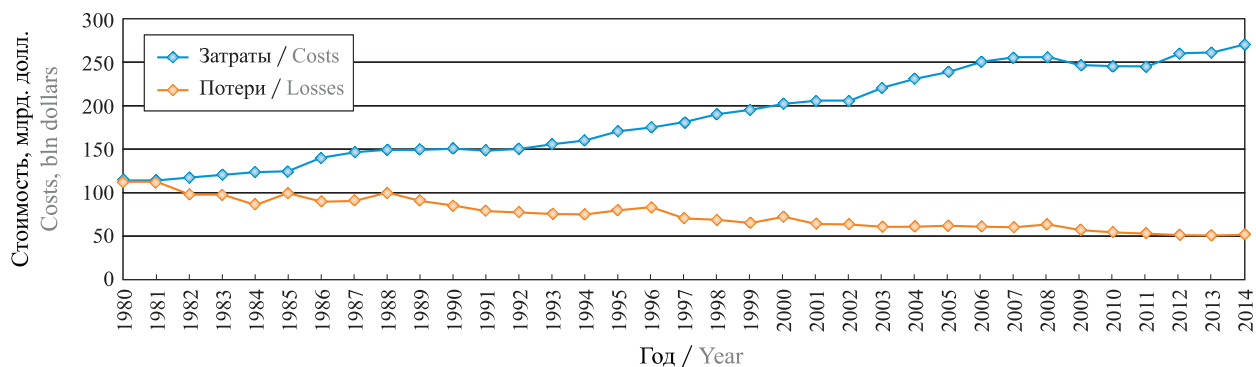
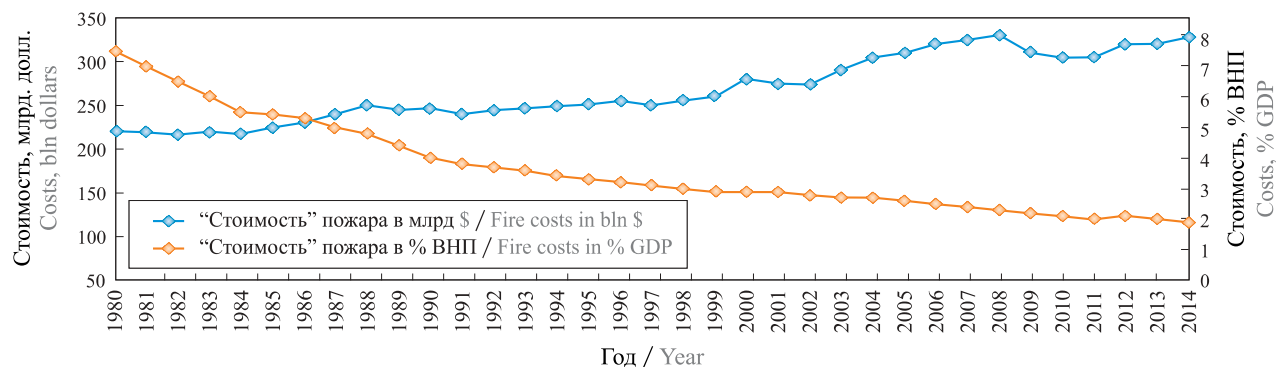


Рис. 8. Обобщенная схема “стоимости” пожаров в США

Fig. 8. Common scheme of fire “cost” in USA

Таблица 3. “Стоимость” пожаров в США в долях ВВП, % / **Table 3.** Fire “cost” in USA in percentage of GDP, %

Компонент “стоимости” пожара Fire “cost” component	ВЦПС [1–7]	Отчет NFPA [13] NFPA report
Потери от пожаров C_1 / Fire losses C_1	0,192	0,321
Содержание пожарной охраны C_2 / Costs of fire service C_2	0,26	0,52
“Пассивная” защита C_3 / Costs fire protection C_3	0,33	0,90
Страхование C_4 / Fire insurance C_4	0,08	0,14
Суммарные затраты и потери $\sum_{i=1}^4 C_i$ / Total costs and losses $\sum_{i=1}^4 C_i$	0,862	1,881
Затраты / Потери Costs / Losses	3,5	4,9

**Рис. 9.** Динамика отношения потерь от пожаров к затратам на борьбу с ними в США в период с 1980 по 2014 гг. [16]**Fig. 9.** Trend in ratio losses to expenditures in USA in 1980 to 2014 [16]**Рис. 10.** Динамика потерь от пожаров и затрат на борьбу с ними в США в период с 1980 по 2014 гг. [16]**Fig. 10.** Trend in losses and expenditures in USA in 1980 to 2014 [16]**Рис. 11.** Динамика “стоимости” пожаров в млрд. долларов (в ценах 2014 г.) и в % ВВП в США в период с 1980 по 2014 гг. [16]**Fig. 11.** Trend in total “cost” in bln. dollars and as a percentage of GDP in USA in 1980 to 2014 [16]

Выводы

Без учета и понимания сути процессов оценки потерь от пожаров и затрат на борьбу с ними невозможно правильно оценить “стоимость” пожаров в современном мире (хотя на “точечные” оценки ориентироваться все-таки можно). При этом нужно учитывать также то, что в отчете [16] были рассмотрены только пожары в зданиях, а лесные пожары и

пожары на транспорте из анализа были исключены. Не были учтены также расходы на тушение пожаров (количество воды и пр.).

Таким образом, если учесть все перечисленные выше факторы, то общая “стоимость” пожаров должна быть еще выше. Теперь можно сказать, что мы получили достаточно достоверные оценки о “стоимости” пожаров в различных странах мира.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ / REFERENCES

1. World Fire Statistics. *Geneva Association Information Newsletter*, October 2005, no. 2. 12 p. Available at: <http://pozhpoeekt.ru/stat/geneva/2005.pdf> (Accessed 3 January 2020).
2. World Fire Statistics. *Geneva Association Information Newsletter*, October 2006, no. 22. 10 p. Available at: <http://pozhpoeekt.ru/stat/geneva/2006.pdf> (Accessed 3 January 2020).
3. World Fire Statistics. *Geneva Association Information Newsletter*, October 2007, no. 23. 10 p. Available at: <http://pozhpoeekt.ru/stat/geneva/2007.pdf> (Accessed 3 January 2020).
4. World Fire Statistics. *Geneva Association Information Newsletter*, October 2008, no. 24. 10 p. Available at: <http://pozhpoeekt.ru/stat/geneva/2008.pdf> (Accessed 3 January 2020).
5. World Fire Statistics. *Geneva Association Information Newsletter*, October 2009, no. 25. 10 p. Available at: <https://www.f-e-u.org/upload/statistics/worldfire/WorldFireStatistics-25-October2009.pdf> (Accessed 3 January 2020).
6. World Fire Statistics. *Geneva Association Information Newsletter*, October 2010, no. 26. 10 p. Available at: <http://pozhpoeekt.ru/stat/geneva/2010.pdf> (Accessed 3 January 2020).
7. World Fire Statistics. *Geneva Association Bulletin*, April 2014, no. 29. 18 p. Available at: <https://www.genevaassociation.org/research-topics/world-fire-statistics-bulletin-no-29> (Accessed 3 January 2020).
8. Брушлинский Н. Н., Соколов С. В., Вагнер П. Человечество и пожары. — М. : ИПЦ Маска, 2007 — 142 с.
N. N. Brushlinskiy, S. V. Sokolov, P. Wagner. *Chelovechestvo i pozhary* [Humanity and fires]. Moscow, IPTs Maska Publ., 2007. 142 p. (in Russian).
9. Аренс М., Брушлинский Н. Н., Вагнер П., Соколов С. В. Обстановка с пожарами в мире в начале XXI века // Пожаровзрывобезопасность/Fire and Explosion Safety. — 2015. — Т. 24, № 10. — С. 51–58.
M. Ahrens, N. N. Brushlinskiy, P. Wagner, S. V. Sokolov. Situation with the fires on the earth at the beginning of the XXI century. *Pozharovzryvobezopasnost/Fire and Explosion Safety*, 2015, vol. 24, no. 10, pp. 51–58 (in Russian). DOI: 10.18322/PVB.2015.24.10.51-58.
10. N. N. Brushlinsky, J. R. Hall, S. V. Sokolov, P. Wagner. *World Fire Statistics. Report No. 18*. Berlin, Center of Fire Statistics of CTIF, 2013. 56 p. Available at: https://www.ctif.org/sites/default/files/ctif_report18_world_fire_statistics_2013.pdf (Accessed 6 January 2020).
11. N. N. Brushlinsky, M. Ahrens, S. V. Sokolov, P. Wagner. *World Fire Statistics. Report No. 19*. Berlin, Center of Fire Statistics of CTIF, 2014. 56 p. Available at: https://www.ctif.org/sites/default/files/ctif_report19_world_fire_statistics_2014.pdf (Accessed 6 January 2020).
12. N. N. Brushlinsky, M. Ahrens, S. V. Sokolov, P. Wagner. *World Fire Statistics. Report No. 20*. Berlin, Center of Fire Statistics of CTIF, 2015. 63 p. Available at: https://www.ctif.org/sites/default/files/ctif_report20_world_fire_statistics_2015.pdf (Accessed 6 January 2020).
13. Брушлинский Н. Н., Кузнецова Е. С., Кружкова О. В., Соловьева Т. Н. Методологические подходы к сравнительной оценке обстановки с пожарами в Российской Федерации и США (часть 1) // Пожары и чрезвычайные ситуации: предотвращение, ликвидация. — 2018. — № 3. — С. 102–109.
N. N. Brushlinsky, E. S. Kuznetsova, O. V. Kruzhkova, T. N. Solovjeva. Methodological approaches to comparative assessment of situation with fires in the Russian Federation and the United States (Part 1). *Pozhary i chrezvychaynyye situatsii: predotvrashcheniye, likvidatsiya/Fire and Emergencies: Prevention, Elimination*, 2018, no. 3, pp. 102–109 (in Russian). DOI: 10.25257/FE.2018.3.102-109.
14. Брушлинский Н. Н., Кузнецова Е. С., Кружкова О. В., Соловьева Т. Н. Методологические подходы к сравнительной оценке обстановки с пожарами в Российской Федерации и США (часть 2) // Пожары и чрезвычайные ситуации: предотвращение, ликвидация. — 2018. — № 4. — С. 48–54.

- N. N. Brushlinsky, E. S. Kuznetsova, O. V. Kruzhkova, T. N. Solovjeva. Methodological approaches to comparative assessment of situation with fires in the Russian Federation and the United States (Part 2). *Pozhary i chrezvychaynyye situatsii: predotvrashcheniye, likvidatsiya / Fire and Emergencies: Prevention, Elimination*, 2018, no. 4, pp. 48–54 (in Russian). DOI: 10.25257/FE.2018.4.48-54.
15. Присяжнюк Н. Л., Александров Г. В., Кузьмичев И. И. Экономика пожарной безопасности : учеб. пособие / Под общ. ред. Н. Л. Присяжнюка. — М. : Академия ГПС МЧС России, 2009. — 248 с.
N. L. Prisyazhnyuk (ed.), G. V. Aleksandrov, I. I. Kuzmichev. *Ekonomika pozharnoy bezopasnosti* [Fire safety economics]. Moscow, State Fire Academy of Emercom of Russia Publ., 2009. 248 p. (in Russian).
 16. J. Zhuang, V. M. Payyappalli, A. Behrendt, K. Lukasiewicz. *Total cost of fire in the United State*. Quincy, MA, NFPA, Fire Protection Research Foundation, 2017. Available at: <https://www.nfpa.org/-/media/Files/News-and-Research/Fire-statistics-and-reports/US-Fire-Problem/RFTotalCost.pdf> (Accessed 6 January 2020).
 17. J. R. Hall, Jr. The total cost of fire in the United State. Quincy, MA, NFPA, Fire Analysis & Research Division, 2014. Available at: <https://docplayer.net/8208995-The-total-cost-of-fire-in-the-united-states.html> (Accessed 3 January 2020).
 18. J. R. Hall, Jr. The total cost of fire in the United State. *NFPA Journal*, September–October 2011. Available at: <https://www.nfpa.org/News-and-Research/Publications-and-media/NFPA-Journal/2011/September-October-2011/News-and-Analysis/Fire-Analysis-and-Research> (Accessed 3 January 2020).
 19. H. Andersson, N. Treich. The value of a statistical life. In: A. de Palma, R. Lindsey, E. Quinet, R. Vickerman (eds.). *A handbook of transport economics*. Cheltenham, UK, Edward Elgar Publishing, 2011, pp. 396–424. DOI: 10.4337/9780857930873.00025.
 20. J. R. Hall, Jr., B. Harwood. The national estimates approach to US fire statistics. *Fire Technology*, 1989, vol. 25, no. 2, pp. 99–113.

Поступила 10.01.2020, после доработки 30.01.2020;

принята к публикации 04.02.2020

Received 6 January 2020; Received in revised form 30 January 2020;

Accepted 4 February 2020

Информация об авторах

БРУШЛИНСКИЙ Н. Н., д-р техн. наук, профессор, академик РАЕН, заслуженный деятель науки РФ, профессор Научно-образовательного комплекса организационно-управленческих проблем ГПС, Академия Государственной противопожарной службы МЧС России, г. Москва, Российская Федерация; ORCID: 0000-0003-0973-7095; e-mail: nbrus1934@yandex.ru

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

Information about the authors

Nikolay N. BRUSHLINSKIY, Dr. Sci. (Eng.), Professor, Professor of Scientific and Educational Department, State Fire Service Academy of Emercom of Russia, Moscow, Russian Federation; ORCID: 0000-0003-0973-7095; e-mail: nbrus1934@yandex.ru

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

УДК 621.316.9/614.8

Современная молниезащита зданий и сооружений. Часть 2

© А. С. Харламенков✉

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

АННОТАЦИЯ

Представлены технические решения с применением активных молниеприемников, работающих по принципу раннего выброса стримера (ESE), и устройств нейтрализации прямого удара молнии (DAS/CTS). Рассмотрены исследования эффективности действия данных систем молниезащиты. Указаны особенности применения ESE-молниеприемников и устройств DAS/CTS для защиты объектов в условиях грозовой активности. Приведены основные результаты анализа работы данных устройств на реальных объектах. Показана нецелесообразность использования устройств ESE и DAS/CTS взамен существующих классических молниеприемников.

Ключевые слова: молниезащита объектов; активные молниеприемники; пожарная безопасность; международный опыт; коммерциализация.

Для цитирования: Харламенков А. С. Современная молниезащита зданий и сооружений. Часть 2 // Пожаровзрывобезопасность/Fire and Explosion Safety. — 2020. — Т. 29, № 1. — С. 89–92.

✉ Харламенков Александр Сергеевич, e-mail: h_a_s@live.ru

Modern lightning protection of buildings and constructions. Part 2

© Aleksandr S. Kharlamenkov✉

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

ABSTRACT

Technical solutions using active lightning rods operating on the principle of Early Streamer Emission (ESE) and device neutralization direct lightning strike (DAS/CTS) are presented. Studies of the effectiveness of the indicated lightning protection systems are considered. Features of the use of ESE and devices for protecting objects in thunderstorm conditions are indicated. The main results of the analysis of the operation of these devices on real objects are given. The inexpediency of using ESE and DAS/CTS devices instead of existing classic lightning rods is shown.

Keywords: lightning protection of objects; active lightning rods; fire safety; international experience; commercialization.

For citation: A. S. Kharlamenkov. Modern lightning protection of buildings and constructions. Part 2. *Pozharovzryvobezopasnost/Fire and Explosion Safety*, 2020, vol. 29, no. 1, pp. 89–92 (in Russian).

✉ Aleksandr Sergeevich Kharlamenkov, e-mail: h_a_s@live.ru



ВОПРОС:

В рубрике “Вопрос–Ответ” № 6 журнала за 2019 г. был представлен ряд технических решений молниезащиты зданий и сооружений от прямых ударов молнии и ее вторичных воздействий. Проведен анализ действующих нормативных документов по молниезащите объектов. Рассмотрены типовые системы молниезащиты, обеспечивающие защиту зданий от прямых ударов. Описан способ снижения опасных воздействий электромагнитной и электростатической индукции внутри объекта путем применения устройств защиты от импульсных перенапряжений (УЗИП). Отмечена нецелесообразность использования активных молниеприемников (ESE terminals) взамен существующих классических решений молниезащиты.

Существуют ли иные способы молниезащиты объектов, за исключением рассмотренных, и насколько они эффективны?

ОТВЕТ:

В первой части статьи [1] отмечалось, что нисходящий канал молнии всегда перехватывается одним из встречных восходящих разрядов (лидеров), развивающихся от возвышающихся заземленных конструкций с малым радиусом кривизны поверхности. Внедрение в проектно-эксплуатационную практику систем молниезащиты с установкой ESE-молниеприемников преследовало цель более раннего (а значит, на большей высоте) перехвата нисходящего канала встречным лидером и увеличения их зоны защиты.



Рис. 1. Примеры различных конструкций ESE-молниеприемников (без учета масштаба)

Из года в год производители ESE-молниеприемников создают новые образцы, проводят испытания и снова требуют от властей узаконить применение оригинальных конструкций в системах молниезащиты. Несколько вариантов таких молниеприемников представлено на рис. 1. Наибольшую популярность получили ESE-молниеприемники, работающие на основе метода сбора объема CVM (*Collection Volume Method*). Такие устройства имеют форму гриба или сферы (*Dynasphere*) с выступающим заостренным электродом в центральной части.

Главным препятствием, не позволяющим внедрять новые виды активных молниеприемников, является отсутствие натурных испытаний и статистических данных по применению образцов продукции. Высокие показатели эффективности продукции подтверждаются производителями путем проведения лабораторных испытаний, зачастую сильно отличающихся от полевых условий. В их публикациях отсутствуют данные о порядке проведения эксперимента, поэтому выводы по результатам исследований в таких статьях вводят читателей в заблуждение.

При изучении рукописей по активным системам молниезащиты следует обращать пристальное внимание на то, кем и в каком журнале (или его разделе) опубликованы материалы. В мировом масштабе следует ориентироваться на точку зрения наиболее именитых специалистов в области молниезащиты и высоковольтной техники (V. Cooray, Э. М. Базелян, V. Rakov, A. M. Mousa, T. Kawamura, C. Mazetti и др.). В своих публикациях они приводят убедительные доводы о бесполезности ESE-молниеприемников и отмечают, что нет никакой разницы в эффективности перехвата молнии между классическими и ESE-системами [2–5]. Поэтому использование новых типов молниеприемников не может привести к расширению защищаемой ими зоны [6], которая по заявлению производителей превышает стандартные размеры в 5 раз.

По результатам анализа и исследования всевозможных вариантов конструкций активных молниеприемников было установлено, что для успешного инициирования встречного лидера с их вершины необходимо иметь дополнительный импульсный генератор с амплитудой не менее 0,5 МВ и длительностью воздействия 0,5 мс [3]. При меньшей длительности импульса развитие лидерной формы встречного разряда не может превышать 5 м, что несущественно расширит зону защиты. Многие про-

изводители объясняют эффективность активных стержней ранним выбросом встречных стримерных разрядов в отличие от классических вариантов. Это не является преимуществом, так как в реальных условиях спуска нисходящего лидера встречные стримерные разряды могут несколько раз начинать свое развитие с вершин заземленных электродов, так и не перейдя в лидерную форму [7].

В активных молниеприемниках, в которых используется схема умножения напряжения, емкость накопительного конденсатора управляющего устройства должна составлять не менее 0,1 мкФ с накапливаемым зарядом 5 мКл [3]. Габаритные размеры такого конденсатора должны значительно превышать размеры современных конструкций активных молниеприемников, поэтому на сегодняшний день они остаются малоэффективными и дорогостоящими для пользователя.

Большим потенциалом обладает система лазерного управления молнией, которая пока недостаточно апробирована на практике. Принцип действия такой установки заключается в создании и направлении в сторону грозового облака мощного лазерного луча, ионизирующего молекулы воздуха и образующего искусственно нагретый плазменный канал, который задает путь для развития молнии. Создание лазерного луча даже небольшой длины позволит преодолеть область коронного разряда, задерживающего развитие встречного разряда у вершины заземленного проводника, что спровоцирует более ранний перехват нисходящего канала молнии. Эффективность такого способа подтверждается результатами лабораторных исследований, представленных в [8]. Вариант управления молнией искусственно удлиняющимся “лазерным молниеприемником” представляется более реалистичным. Однако главным препятствием на пути реализации такой системы является отсутствие мощного импульсного источника энергии [9], поэтому создание эффективной системы лазерного управления молнией будет сопряжено со значительными денежными затратами на производство и реализацию таких устройств.

Если отсутствует возможность более раннего перехвата молнии, то есть смысл рассмотреть системы молниезащиты, в которых молниеприемники будут задерживать развитие встречных лидеров и тем самым предотвращать прямой удар в объект защиты. Данные устройства



Рис. 2. Различные виды активных устройств защиты зданий от прямых ударов молнии

относятся к активной молниезащите и имеют различные названия (рис. 2): *DAS* (*Dissipation Array System* — система рассеивающего массива); *CTS* (*Charge Transfer System* — система передачи заряда); *PDCE* (*Pararrayos desionizantes de carga electrostática* — молниеотвод-деионизатор электростатического заряда); *CMCE* (*Multiple Electric Field Compensator* — многократный компенсатор электрического поля); *BCAT/BLT* (*Bipolar Conventional Air Terminal/Bipolar Lightning Terminal* — биполярный молниеприемник). Называть данные устройства молниеприемниками не совсем корректно, так как у них обратная задача — отводить молнию от себя.

Идея использования многоточечного разрядника для нейтрализации облачных зарядов была впервые предложена чешским ученым Прокопом Дивишем еще в 1754 г. И только в 1971 г. начались попытки активного внедрения систем и устройств нейтрализации нисходящих лидерных разрядов молнии в США. В течение последующих 10 лет работоспособность этих систем не раз опровергалась теоретическими и полевыми испытаниями на военных и правительственных объектах, но попытки их внедрения продолжают и по сей день. Меняются названия и внешний вид молниеприемников, но общий принцип действия остается неизменным. Он заключается в создании на верхушке конструкции

коронных разрядов на плотно расположенных проводниках или на электродах с большим радиусом кривизны. В системе *DAS* на полусферической поверхности расположено 5000–10000 металлических игл высотой около 10 см. Производители заявляют, что их совместное действие позволяет нейтрализовать (отводить от объекта) отрицательный нисходящий лидер за счет распределения общего заряда между иглами. Это должно привести к уменьшению напряженности электрического поля на вершине устройства и исключить образование встречного лидера [10]. Идентичный эффект приписывают всем аналогичным устройствам, но их влияние на нисходящий лидер заметно меньше *DAS*-системы из-за меньшей площади коронирующих поверхностей. Эффективность использования вышеперечисленных устройств в качестве нейтрализатора нисходящих разрядов молнии была опровергнута многими научными публикациями [11, 12]. Такие крупные организации, как *CIGRE* и *NFPA*, выпустили отдельные отчеты о неэффективности и даже опасности применения существующих активных молниеприемников и систем нейтрализации нисходящих лидеров для защиты зданий и сооружений [13, 14]. В материалах отмечается, что устройства с большим радиусом кривизны поверхности, установленные над защищаемым объектом, снижают вероят-

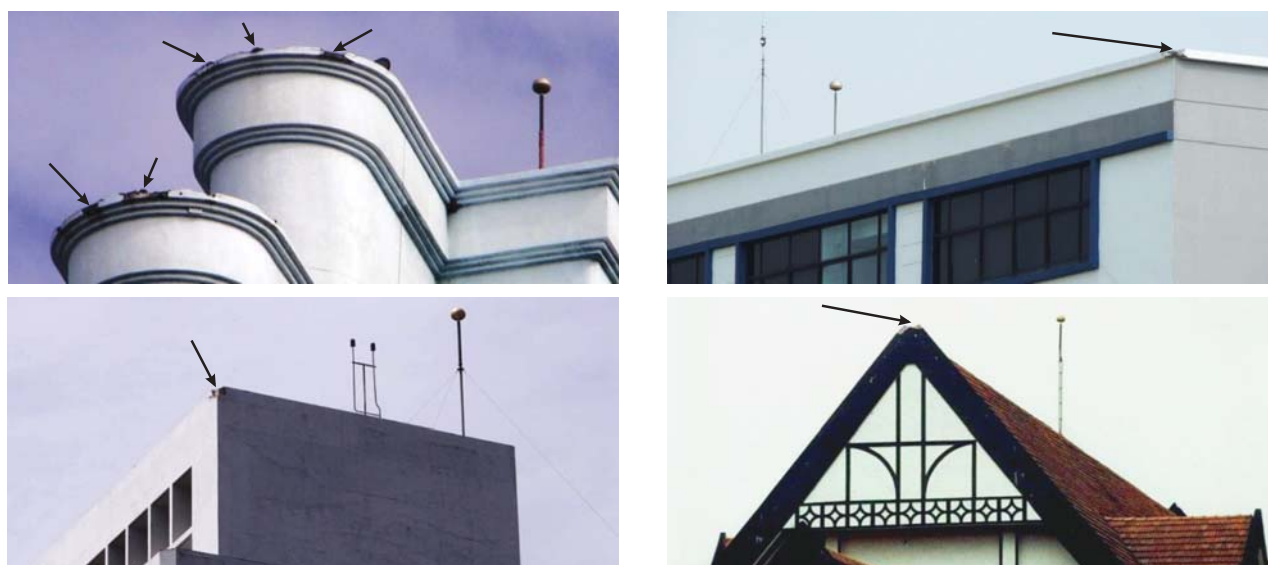


Рис. 3. Повреждения строений, оборудованных активными молниеприемниками, в Малайзии

ность образования встречных разрядов по сравнению с обычными молниеприемниками приблизительно на 15 % при условии их расположения на высоте более 100 м от уровня земли. Поэтому положительный эффект от применения таких устройств можно наблюдать на объектах большой высоты с малой площадью сечения (труба, колонна, шпиль и т. п.). Для систем DAS можно рассматривать дополнительную защиту в верхней части объекта, расположенного под молниеприемником, от механического повреждения при прямом ударе молнии за счет его экранирования полусферической поверхностью молниеотвода и качественного заземления. Это не исключает попадания молнии в боковую поверхность конструкции защищаемого объекта.

В заключение следует отметить, что за последние 10 лет специалистами было собрано достаточно данных по практическому применению активных молниеприемников в Малайзии, занимающей по грозовой активности 3-е место в мире после Индонезии и Колумбии. Среднее число грозовых дней в году там колеблется в пределах 180–260, а число ударов молний на 1 км² земной поверхности в год составляет 45–90, что в 30 раз больше по сравнению с Россией за аналогичный период.

Именно из-за высокой грозовой активности в Малайзии остро стоит вопрос о способах защиты населения и территории от ударов молнии, поэтому многие здания и сооружения оборудованы новейшими (активными) устройствами молниезащиты. Анализ работы этих устройств с начала 2000-х годов показал опасность применения активных молниеприемников [15]. Установка единичных стержней на объектах с большой площадью и доверительное отношение властей к заявленным защитным характеристикам оборудования привели не только к повреждению самих зданий, но и к гибели людей. Примеры повреждений различных объектов защиты представлены на рис. 3.

Результаты исследований показывают, что и в обозримом будущем традиционные молниеотводы останутся основой молниезащиты. Поэтому следует не гнаться за дорогими новинками, способными защитить огромные площади от ударов молнии, а больше внимания уделять совершенствованию и своевременному техническому обслуживанию существующих систем молниезащиты [16], которые, как показывает практика, на многих объектах находятся в плачевном состоянии.

В следующей части статьи будут рассмотрены способы реализации профилактической (превентивной) молниезащиты для обеспечения безопасности производственных работ и персонала.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Харламенков А. С. Современная молниезащита зданий и сооружений. Часть 1 // Пожаровзрывобезопасность/Fire and Explosion Safety. — 2019. — Т. 28, № 6. — С. 89–91.

Информация об авторе

ХАРЛАМЕНКОВ Александр Сергеевич, старший преподаватель кафедры специальной электротехники, автоматизированных систем и связи, Академия ГПС МЧС России, г. Москва, Российская Федерация; e-mail: h_a_s@live.ru

2. Cooray V. The similarity of the action of Franklin and ESE lightning rods under natural conditions // Atmosphere. — 2018. — Vol. 9, Issue 6. — P. 225–230. DOI: 10.3390/atmos9060225.

3. Базелян Э. М. Вопросы практической молниезащиты. — М. : ИМАГ, 2015. — 208 с.

4. Chrzan K. L. Early streamer emission terminals from the high voltage engineering perspective // Lecture Notes in Electrical Engineering. — 2020. — Vol. 599. — P. 773–783. DOI: 10.1007/978-3-030-31680-8_75.

5. Mousa A. M. Failure of the Collection Volume Method and attempts of the ESE lightning ROD industry to resurrect it // Journal of Lightning Research. — 2012. — No. 4, Issue 1. — P. 118–128. DOI: 10.2174/1652803401204010118.

6. Власов А. А. Активная молниезащита: принцип действия, анализ эффективности по сравнению с пассивной молниезащитой // Актуальные проблемы энергетики. — Минск : БНТУ, 2017. — С. 80–84.

7. Becerra M. Corona discharges and their effect on lightning attachment revisited: Upward leader initiation and downward leader interception // Atmospheric Research. — 2014. — Vol. 149. — P. 316–323. DOI: 10.1016/j.atmosres.2014.05.004.

8. Apollonov V. High-conductivity channels in space // Springer Series on Atomic, Optical, and Plasma Physics. — Cham : Springer, 2018. — Vol. 103. — 326 p. DOI: 10.1007/978-3-030-02952-4.

9. Базелян Э. М., Райзер Ю. П. Механизм притяжения молнии и проблема лазерного управления молнией // Успехи физических наук. — 2000. — Т. 170, № 7. — С. 753–769.

10. Carpenter R. B., Jr., Carpenter P., Sletten D. N. Preventing direct lightning strikes. Rev. B. — Boulder, Colorado : Lightning Eliminators & Consultants, Inc., 2014. — 15 p.

11. Uman M. A., Rakov V. A. A critical review of nonconventional approaches to lightning protection // Bulletin of the American Meteorological Society. — 2002. — Vol. 83, Issue 12. — P. 1809–1820. DOI: 10.1175/bams-83-12-1809.

12. Rakov V. A., Uman M. A. Lightning: physics and effects. — Cambridge : Cambridge University Press, 2003. — 706 p. DOI: 10.1017/cbo9781107340886.

13. NFPA 780. Memorandum of Technical Committee on Lightning Protection. No. 1209 — Public Comment Review. — Quincy : NFPA, 2016. — 114 p.

14. CIGRE WG C4.405. Report. Lightning interception. Non-conventional lightning protection systems // Cooray V. / Ed. of Electra, 2011. — No. 258. — P. 36–41.

15. Hartono Z. A., Robiah I. The ESE and CVM lightning air terminals: A 25 year photographic record of chronic failures // APL 2017. The 10th Asia Pacific International Conference on Lightning (May 16–19, 2017, Krabi Resort, Krabi, Thailand). — 6 p. URL: http://lightningsafety.com/nlsi_lhm/APL2017_Hartono.pdf.

16. Скрипко А. Н., Мисун Л. В. К вопросу профилактики пожаров путем совершенствования средств молниезащиты // Пожарная безопасность: проблемы и перспективы. — 2015. — Т. 1, № 1(6). — С. 84–85.

Материал поступил в редакцию 27.01.2020

Received 27 January 2020

Information about the author

Aleksandr S. KHARLAMENKOV, Senior Lecturer of Department of Special Electrical Engineering, Automation Systems and Communication, State Fire Academy of Emercom of Russia, Moscow, Russian Federation; e-mail: h_a_s@live.ru

ПРАВИЛА ДЛЯ АВТОРОВ!

Направляемые в журнал “ПОЖАРОВЗРЫВОБЕЗОПАСНОСТЬ/FIRE AND EXPLOSION SAFETY” статьи должны содержать результаты научных исследований и испытаний, описания новых технических устройств и программно-информационных продуктов; обзоры, комментарии к нормативно-техническим документам, справочные материалы и т. п. Авторы должны указать, к какому типу относится их статья:

- научно-теоретическая;
- научно-эмпирическая;
- аналитическая (обзорная);
- дискуссионная;
- рекламная.

Не допускается направлять в редакцию работы, которые были опубликованы и/или приняты к печати в других изданиях.

Редакция просит авторов при подготовке рукописи руководствоваться изложенными ниже правилами.

1. Статья и сопутствующие ей материалы должны быть направлены через электронную редакцию по адресу info@fire-smi.ru.

Статья должна быть ясно и лаконично изложена и подписана всеми авторами (скан страницы с подписями). Основной текст статьи должен содержать в себе четкие, логически взаимосвязанные разделы. Все разделы должны начинаться приведенными ниже заголовками, выделенными полужирным начертанием. Для научной статьи традиционными являются следующие разделы:

- введение;
- материалы и методы (методология) — для научно-эмпирической статьи;
- теоретические основы (теория и расчеты) — для научно-теоретической статьи;
- результаты и их обсуждение;
- заключение (выводы).

Редакция допускает и иную структуру, обусловленную спецификой конкретной статьи (аналитической (обзорной), дискуссионной, рекламной) при условии четкого выделения разделов:

- введение;
- основная (аналитическая) часть;
- заключение (выводы).

Подробную информацию о содержании каждого из обозначенных выше разделов см. на сайте издательства www.fire-smi.ru.

Материал статьи должен излагаться в следующем порядке.

2.1. Номер УДК (универсальная десятичная классификация).

2.2. Заглавие статьи (на русском и английском языках). Заглавия научных статей должны быть точными и лаконичными и в то же время достаточно информативными; в них можно использовать только общепринятые сокращения. В переводе заглавий статей на английский язык недопустима транслитерация с русского языка, кроме неперебиваемых названий собственных имен, приборов и других объектов, имеющих собственные названия, а также неперебиваемый сленг, известный только русскоговорящим специалистам. Это касается также аннотаций, авторских резюме и ключевых слов.

2.3. Информация об авторах.

2.3.1. Имена, отчества и фамилии всех авторов. Они должны приводиться полностью на русском языке и в транслитерации в соответствии с системой, которая в настоящее время является наиболее распространенной (<http://fotosav.ru/services/transliteration.aspx>).

Авторами являются лица, принимавшие участие во всей работе или в ее главных разделах. Лица, участвовавшие в работе частично, указываются в сносках.

2.3.2. Ученые степени, звания, должность, место работы всех авторов с полным юридическим адресом (на русском и английском языках). Здесь необходимо указать: полное официальное название организации, страну, индекс, город, название улицы, номер дома,

а также контактные телефоны и электронные адреса всех авторов; дать информацию о контактном лице. Обращаем Ваше внимание, что при переводе необходимо указывать официально принятое название организации на английском языке. Все почтовые сведения (кроме наименования улицы, которое должно быть в транслитерированном виде) должны быть также переведены на английский язык, в том числе название города и страны.

Пример: *Institute for Problem in Mechanics, Russian Academy of Sciences (Vernadskogo Avenue, 101, Moscow, 119526, Russian Federation).*

2.3.3. ORCID, Researcher ID, Scopus Author ID.

2.4. Расширенное резюме на русском и английском языках. Необходимо иметь в виду, что авторское резюме на английском языке в русскоязычном издании является для иностранных ученых и специалистов основным и, как правило, единственным источником информации о содержании статьи и об изложенных в ней результатах исследований. Поэтому авторское резюме должно быть:

- информативным (не содержать общих слов);
- содержательным (должно отражать существенные результаты работы; не должно включать материал, который отсутствует в основной части публикации);
- структурированным (т. е. следовать логике описания результатов в публикации);
- грамотным (написанным качественным английским языком, без использования программ автоматизированного перевода);
- объемом не менее 200–250 слов.

Структура резюме должна повторять структуру статьи и включать четко обозначенные подразделы Введение (Introduction), Цели и задачи (Aims and Purposes), Методы (Methods), Результаты (Results), Обсуждение (Discussion), Заключение (выводы) (Conclusions).

Результаты работы следует описывать предельно точно и информативно. При этом должны приводиться основные теоретические и экспериментальные результаты, фактические данные, установленные взаимосвязи и закономерности.

Выводы могут сопровождаться рекомендациями, оценками, предложениями, гипотезами, описанными в работе.

Текст должен быть связным; излагаемые положения должны логично вытекать одно из другого.

Сокращения и условные обозначения, кроме общепотребительных, следует применять в исключительных случаях или давать их расшифровку и определение при первом упоминании в тексте резюме.

В авторское резюме не следует включать схемы, таблицы, иллюстрации, формулы, а также ссылки на публикации, приведенные в списке литературы к статье.

Для повышения эффективности при онлайн-поиске включите в текст аннотации ключевые слова и термины из основного текста и заглавия статьи.

2.5. Ключевые слова на русском и английском языках (не менее 5 слов или коротких словосочетаний). Они указываются через точку с запятой. Недопустимо в качестве ключевых слов использовать термины общего характера (например, проблема, решение и т. п.), не являющиеся специфической характеристикой публикации. Используемые в заголовке слова и термины не нужно повторять в качестве ключевых слов: ключевые слова должны дополнять информацию в заголовке. При переводе ключевых слов на английский язык избегайте по возможности употребления слов “and” (и), “of” (предлог, указывающий на принадлежность), артиклей “a”, “the” и т. п.

2.6. Основной текст статьи должен быть набран через 1,5 интервала в формате Word. Формулы должны быть набраны в Microsoft Equation или MathType.

Цитируемый текст из других публикаций следует брать в кавычки. Таблицы, рисунки, методы, численные данные (за исключением общеизвестных величин), опубликованные ранее, должны сопровождаться ссылками.

Если представленные в статье исследования выполнены авторами при финансовой поддержке Российского фонда фундаментальных исследований, Российского научного фонда, Министерства образования и науки Российской Федерации и т. п., то в конце статьи обязательно следует дать информацию об этом с указанием номера и названия гранта (научного проекта, госконтракта и т. д.).

Сокращения и условные обозначения физических величин в тексте статьи должны соответствовать действующим международным стандартам. Формулы и буквенные обозначения должны быть четкими и ясными. Все буквенные обозначения, входящие в формулы, должны быть расшифрованы с указанием единиц измерения. Размерность всех характеристик должна соответствовать системе СИ.

Иллюстрации в электронной версии прилагаются отдельно. Фотографии должны быть сделаны с хорошего негатива контрастной печатью (файлы растровых изображений предоставляются с разрешением не менее 300 dpi, черно-белая штриховая графика — 600 dpi). Файлы векторной графики следует предоставлять в формате той программы, в которой они созданы, либо печатать PDF-файл из этой программы. Все иллюстрации должны иметь сквозную нумерацию. Чертежи и карты в качестве иллюстраций неприемлемы. Ссылки на все рисунки в тексте обязательны.

Таблицы должны быть составлены лаконично и содержать только необходимые сведения; однотипные таблицы следует строить одинаково. Цифровые данные необходимо округлять в соответствии с точностью эксперимента. Сведения в таблицах и на рисунках не должны повторяться. Ссылки на все таблицы в тексте обязательны.

В журнале предусматривается двуязычное представление табличного и графического материала, поэтому необходимо прислать перевод на английский язык:

- для таблицы: ее названия, шапки, боковика, текста во всех строках, сноска и примечаний;
- для рисунка: подписанной подписи и всех текстовых надписей на самом рисунке;
- для схемы: подписи к ней и всего содержания самой схемы.

2.7. Пристайные списки литературы на русском языке и языке оригинала (если книга переводная).

Список литературы должен включать библиографические сведения обо всех публикациях, упоминаемых в статье, и не должен содержать указаний на работы, на которые в тексте нет ссылок. Литература должна быть оформлена в виде общего списка в порядке упоминания. В тексте ссылка на литературу отмечается порядковой цифрой в квадратных скобках, например [1]. Библиографические данные приводятся по титульному листу издания. Порядок изложения элементов библиографического описания определяется требованиями ГОСТ 7.1–2003 и ГОСТ Р 7.0.5–2008.

В описании источников необходимо указывать всех авторов.

Наряду с этим для научных статей список литературы должен отвечать следующим требованиям.

Список литературы должен содержать не менее 20 источников (в это число не входят нормативные документы, патенты, ссылки на сайты компаний и т. п.). При этом количество ссылок на статьи из иностранных научных журналов и другие иностранные источники должно быть не менее 40 % от общего количества ссылок. Не более половины от оставшихся 60 % должны составлять статьи из русскоязычных научных журналов, остальное — другие первоисточники на русском языке.

Не менее половины источников должно быть включено в один из ведущих индексов цитирования: Российский индекс научного цитирования eLibrary, Web of Science, Scopus, Chemical Abstracts, MathSciNet, Springer и др. В случае присвоения публикациям цифрового идентификатора объекта (DOI) его необходимо указать, что позволит однозначно идентифицировать объект в базах данных.

Состав источников должен быть актуальным и содержать не менее половины современных (не старше 10 лет) статей из научных журналов или других публикаций.

В списке литературы должно быть не более 30 % источников, автором либо соавтором которых является автор статьи.

Следует обратить внимание на публикации диссертаций (особенно докторских), защищенных в последние годы по ближайшей научной специальности или группе специальностей. Для поиска рекомендуется использовать ресурс <http://www.disscat.com>.

Не следует включать в список литературы ГОСТы; ссылки на них должны быть даны непосредственно по тексту статьи.

Убедитесь, что указанная в списке литературы информация (Ф.И.О. автора, название книги или журнала, год издания, том, номер и количество (интервал) страниц) верна.

Неопубликованные результаты, проекты документов, личные сообщения и т. п. не следует указывать в списке литературы, но они могут быть упомянуты в тексте.

2.8. References (пристайные списки литературы на английском языке). Представление в References только транслитерированного (без перевода) описания недопустимо. Обращаем Ваше внимание, что перевод названия статей следует давать так, как он проходил при их публикации, а перевод названий журналов должен быть официально принятым. Произвольное сокращение названий источников цитирования приведет к невозможности идентифицировать ссылку в электронных базах данных.

При составлении References необходимо следовать схеме:

- ИОФ авторов (транслитерация; для ее написания используйте сайт <http://fotosav.ru/services/transliteration.aspx>, обязательно включив в настройках справа сверху флажок “Американская (для визы США)”); если автор цитируемой статьи имеет свой вариант транслитерации своей фамилии, следует использовать этот вариант);
- заглавие на английском языке — для статьи, транслитерация и перевод названия — для книги;
- название источника (журнала, сборника статей, материалов конференции и т. п.) в транслитерации и на английском языке (курсивом, через косую черту);
- выходные данные;
- указание на язык изложения материала в скобках (например, (in Russian)).

Например: D. N. Sokolov, L. P. Vogman, V. A. Zuykov. Microbiological spontaneous ignition. *Pozharnaya bezopasnost / Fire Safety*, 2012, no. 1, pp. 35–48 (in Russian) (другие примеры см. www.fire-smi.ru).

3. Статьи, присланные не в полном объеме, на рассмотрение не принимаются.

4. В случае получения замечаний в ходе внутреннего рецензирования статьи авторы должны предоставить доработанный вариант текста в срок не более одного месяца с обязательным выделением цветом внесенных изменений, а также отдельно подготовить конкретные ответы-комментарии на все вопросы и замечания рецензента.

Несвоевременный, а также неадекватный ответ на замечания рецензентов и научных редакторов приводит к задержке публикации до исправления указанных недостатков. При игнорировании замечаний рецензентов и научных редакторов рукопись снимается с дальнейшего рассмотрения.

5. Непринятые к публикации статьи автору не возвращаются. Просьба редакции о переработке материала не означает, что он принят к печати.

Предпечатная подготовка статей оплачивается за счет средств подписчиков и третьих лиц, заинтересованных в публикации.

Редакция оставляет за собой право считать, что авторы, предоставившие рукопись для публикации в журнале “Пожаровзрывобезопасность / Fire and Explosion Safety”, согласны с условиями публикации или отклонения рукописи, а также с правилами ее оформления!

Александр Яковлевич КОРОЛЬЧЕНКО

19.01.1939–13.02.2020



С прискорбием сообщаем, что 13 февраля 2020 г. на 81-м году жизни скончался **Александр Яковлевич КОРОЛЬЧЕНКО**, полковник внутренней службы, доктор технических наук, профессор, академик МАНЭБ. Журнал “Пожаровзрывобезопасность” лишился своего основателя и бессменного главного редактора.

Александр Яковлевич родился 19 января 1939 г.

В 1965 г. он окончил Московский химико-технологический институт имени Д. И. Менделеева.

Значительную часть своей жизни (1976–1997 гг.) А. Я. Корольченко посвятил работе во Всесоюзном научно-исследовательском институте противопожарной обороны (ВНИИПО), пройдя путь от младшего научного сотрудника до заместителя начальника института.

Александр Яковлевич — создатель научной школы в области пожаровзрывоопасности веществ и материалов, пожаровзрывоопасности технологических процессов. Обладая уникальной способностью объединять вокруг себя коллег и единомышленников, он щедро делился своими знаниями и опытом с учениками. Им подготовлено 9 докторов и 30 кандидатов наук.

А. Я. Корольченко разработал методику оценки достоверности данных по показателям пожаровзрывоопасности веществ и материалов, с использованием которой создан отечественный банк данных по опасным свойствам веществ.

Александр Яковлевич стоял у истоков отечественной системы сертификации продуктов и услуг в области пожарной безопасности: им создан первый в России орган по сертификации в этой области.

С 1997 г. профессор А. Я. Корольченко работал в МГСУ. Здесь им создана кафедра пожарной безопасности (в дальнейшем — кафедра комплексной безопасности в строительстве). В 2019 г. состоялся десятый выпуск инженеров по пожарной безопасности, в чем большая заслуга Александра Яковлевича.

Все, кому посчастливилось работать с А. Я. Корольченко, помнят его как принципиального и доброжелательного человека, умеющего находить нестандартные решения, добиваться делового и спокойного обсуждения научных и производственных вопросов. Благодаря своему профессионализму, широте и многогранности научных интересов, эрудиции, Александр Яковлевич пользовался заслуженным авторитетом и уважением в нашей стране и за рубежом. Он обладал исключительной деликатностью и интеллигентностью, умением выслушивать и убеждать коллег, способностью решать сложные проблемы взаимоотношений между людьми, всегда был готов прийти на помощь коллегам, попавшим в трудное положение.

Светлая память об Александре Яковлевиче КОРОЛЬЧЕНКО навсегда сохранится в сердцах его коллег, друзей, учеников и всех, кто его знал.

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

Открыта
подписка
на журнал

2020

ПОЖАРОВЗРЫВО- БЕЗОПАСНОСТЬ



По вопросам подписки
просьба обращаться
по тел.: (495) 228-09-03,
8-909-940-01-85 или
по e-mail info@fire-smi.ru

- Стоимость подписки на 1-е полугодие 2020 г. (3 номера) — 5901 руб.
- Стоимость годовой подписки (6 номеров) — 10260 руб.

ЭЛЕКТРОННАЯ ВЕРСИЯ:

- Стоимость подписки на 1-е полугодие 2020 г. (3 номера) — 2460 руб.
- Стоимость годовой подписки (6 номеров) — 4680 руб.

ПОДПИСКА ОСУЩЕСТВЛЯЕТСЯ:

- через ООО “Издательство “Пожнаука”;
- ЧЕРЕЗ ПОДПИСНЫЕ АГЕНТСТВА:
- ООО “Урал-Пресс”, индекс 83647 (полугодовой), 70753 (годовой);
- ООО “Агенство “Книга Сервис”, индекс 83647 (полугодовой), 70753 (годовой);
- ЗАО “ПРЕССИНФОРМ”, индекс 83647 (полугодовой), 70753 (годовой)

ВЫСТАВКА технических средств охраны
и оборудования для обеспечения
безопасности и противопожарной защиты



**26–29
февраля
2020**

Краснодар
ВКК «Экспоград Юг»

**ПОЛУЧИТЕ
БЕСПЛАТНЫЙ
БИЛЕТ**
на сайте
securexpo.ru

ВАШ ПРОМОКОД
K73-BJ-1365



РЕКЛАМА

12+

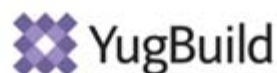
Организатор



Международная
Выставочная
Компания

+7 (861) 200-12-50, 200-12-34
securexpo@mvk.ru

ОДНОВРЕМЕННО С ВЫСТАВКОЙ





ИНСТИТУТ КОМПЛЕКСНОЙ БЕЗОПАСНОСТИ В СТРОИТЕЛЬСТВЕ

Национальный исследовательский
Московский государственный
строительный университет

Научно-
исследовательские
и сертификационные
испытания:

- ♦ железобетонных конструкций
- ♦ противопожарных преград
- ♦ легкосбрасываемых конструкций
- ♦ фасадных систем
- ♦ палуб, переборок

Контакты:

Тел.: 8 (495) 109-05-58

e-mail: ikbs@mgsu.ru,

mail@ikbs-mgsu.com

www.ikbs-mgsu.com

Свидетельство о признании испытательной лаборатории
Аттестат аккредитации № РОСС RU.0001.21AM09 от 24.06.2014 г.
РМРС № 16.00385.120 от 28.12.2016 г.