

1-2024

FIRE and EXPLOSION
SAFETY

ПОЖАРОВЗРЫВО-

БЕЗОПАСНОСТЬ



НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКИЙ ЖУРНАЛ

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

КОМПЛЕКСНАЯ БЕЗОПАСНОСТЬ

пожарная • промышленная • производственная • экологическая



ВЛИЯНИЕ СВЕТОПОГОДЫ
НА ТЕКСТИЛЬНЫЕ СРЕДСТВА
ИНДИВИДУАЛЬНОЙ ЗАЩИТЫ
ОТ ПАДЕНИЯ С ВЫСОТЫ
В СТРОИТЕЛЬНОЙ ОТРАСЛИ



85 лет

Памяти Александра Яковлевича КОРОЛЬЧЕНКО

19 января 2024 г. исполнилось бы 85 лет выдающемуся ученому, доктору технических наук, профессору, академику МАНЭБ Александру Яковлевичу Корольченко.

Александр Яковлевич окончил Московский химико-технологический институт имени Д.И. Менделеева.

Александр Яковлевич Корольченко — создатель научной школы в области пожаровзрывоопасности веществ и материалов. Им разработана отечественная система оценки пожаровзрывоопасности веществ и материалов, которая введена в практику в виде ГОСТ 12.1.044 «Система стандартов безопасности труда. Пожаровзрывоопасность веществ и материалов. Номенклатура показателей и методы определения», а также создан отечественный банк данных по опасным свойствам веществ и материалов. На основе детального изучения механизма двухстадийного окисления предельных газоздушных смесей и описания механизма развития пылевых веществ им совместно с учениками разработаны и внедрены в практику методы расчета показателей пожаровзрывоопасности индивидуальных веществ и многокомпонентных смесей. По результатам исследования процессов флегматизации и ингибирования горения газо- и пылевоздушных смесей определены методы расчета флегматизирующих концентраций.

Под руководством А.Я. Корольченко сформулированы основные принципы обеспечения пожаровзрывобезопасности технологических процессов, реализованные в ГОСТах.

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.

А.Я. Корольченко является автором более 300 научных работ, среди которых учебники и монографии. Им получено 18 авторских свидетельств на изобретения. Более 28 лет Александр Яковлевич был бессменным главным редактором научно-технического журнала «Пожаровзрывобезопасность».

Александр Яковлевич обладал уникальной способностью объединять вокруг себя коллег и единомышленников, он щедро делился своими знаниями и опытом с учениками. Им подготовлено 9 докторов и более 30 кандидатов наук.

**Можно бесконечно долго перечислять заслуги
этого выдающегося ученого и специалиста.
Вклад, внесенный Александром Яковлевичем Корольченко
в развитие области пожарной безопасности, неоценим!**





УЧРЕДИТЕЛЬ и ИЗДАТЕЛЬ —

ФГБОУ ВО «Национальный
исследовательский
Московский государственный
строительный университет»

Адрес:

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

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

СМИ зарегистрировано Федеральной
службой по надзору в сфере связи,
информационных технологий и массовых
коммуникаций — свидетельство
ПИ № ФС 77-79402 от 2 ноября 2020 г.
Префикс DOI: 10.22227

РЕДАКЦИЯ:

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

Адрес редакции:

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

Адрес для переписки:

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

E-mail: info@fire-smi.ru

https://www.fire-smi.ru

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

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

Подписано в печать 26.02.2024.

Выход в свет 29.02.2024.

Формат 60 × 84 1/8. Тираж 2000 экз.

Бумага мелованная матовая.

Печать офсетная. Цена свободная.

Распространяется по подписке.

Отпечатано в типографии

Издательства МИСИ – МГСУ

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

Фото для оформления журнала взяты с сайтов: www.ro.wikipedia.org,
www.krd.energo-e.ru

ГЛАВНЫЙ РЕДАКТОР:

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

ЗАМ. ГЛАВНОГО РЕДАКТОРА:

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

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

РЕДАКЦИОННАЯ КОЛЛЕГИЯ:

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

СОДЕРЖАНИЕ

CONTENTS

ОБЩИЕ ВОПРОСЫ КОМПЛЕКСНОЙ БЕЗОПАСНОСТИ

GENERAL QUESTIONS OF COMPLEX SAFETY

А.В. ПЕХОТИКОВ, А.А. АБАШКИН,
А.В. ГОМОЗОВ, С.А. ЛУЧКИН
Апробация и анализ нормативных требований
по защите лестничных клеток с открытыми проемами
при распространении пожара по фасаду

5

A.V. PEKHOTIKOV, A.A. ABASHKIN,
A.V. GOMOZOV, S.A. LUCHKIN
Approbation and analysis of regulatory requirements
for protection of stairwells with open doorways in case
of fire propagation along the facade

ПРОЦЕССЫ ГОРЕНИЯ, ДЕТОНАЦИИ И ВЗРЫВА

COMBUSTION, DETONATION AND EXPLOSION PROCESSES

А.А. КОМАРОВ
Особенности расчета параметров
газодинамических потоков при аварийных взрывах

15

A.A. KOMAROV
Analysis of parameters of gas dynamic flows
in case of emergency explosions

БЕЗОПАСНОСТЬ ВЕЩЕСТВ И МАТЕРИАЛОВ

SAFETY OF SUBSTANCES AND MATERIALS

О.В. БЕЗЗАПОННАЯ, С.В. МАКАРКИН, П.А. ГЛУХИХ
Идентификация термопластичных полимеров
методом синхронного термического анализа

24

O.V. BEZZAPONNAYA, S.V. MAKARKIN, P.A. GLUKHIKH
Identification of thermoplastic polymers
by method of synchronous thermal analysis

А.А. РУМЯНЦЕВА, И.О. ФЕДОТОВ,
А.Б. СИВЕНКОВ, Ю.К. НАГАНОВСКИЙ
Влияние длительного естественного старения бумаги
на ее свойства и термическую устойчивость

36

A.A. RUMYANTSEVA, I.O. FEDOTOV,
A.B. SIVENKOV, Yu.K. NAGANOVSKIY
Influence of long-term natural aging of paper
on its properties and thermal stability

БЕЗОПАСНОСТЬ ЗДАНИЙ, СООРУЖЕНИЙ, ОБЪЕКТОВ

SAFETY OF BUILDINGS, STRUCTURES, OBJECTS

С.В. ПУЗАЧ, Н.И. КОНСТАНТИНОВА,
Р.Г. АКПЕРОВ, А.О. ОВЧИННИКОВ
Исследование параметров токсичности
продуктов горения мягких элементов мебели

51

S.V. PUZACH, N.I. KONSTANTINOVA,
R.G. AKPEROV, A.O. OVCHINNIKOV
Investigation of toxicity parameters of combustion products
of upholstered furniture elements

БЕЗОПАСНОСТЬ ЖИЗНЕДЕЯТЕЛЬНОСТИ

LIFE SAFETY

Д.А. КОРОЛЬЧЕНКО, С.Г. ЦАРИЧЕНКО,
Д.А. ПРОСТАКИШИН, Н.А. КАШИНОВА
Влияние светопогоды на текстильные средства
индивидуальной защиты от падения с высоты
в строительной отрасли

60

D.A. KOROLCHENKO, S.G. TSARICHENKO,
D.A. PROSTAKISHIN, N.A. KASHINOVA
The effect of light and weather on textile personal protective
equipment against falls from a height in the construction
industry

Е.Б. СУГАК, А.Д. КОРОЛЬЧЕНКО
О проблемах функционирования
современной системы управления охраной труда

73

E.B. SUGAK, A.D. KOROLCHENKO
Functioning of a modern occupational safety
management system

СТАТИСТИКА И СИСТЕМНЫЙ АНАЛИЗ

STATISTICS AND SYSTEM ANALYSIS

В.Я. ВИЛИСОВ, Р.Ш. ХАБИБУЛИН
Кластеризация пожаров на объектах топливно-
энергетического комплекса по ретроспективным
статистическим данным для выявления рангов пожаров

83

V.Ya. VILISOV, R.Sh. KHABIBULIN
Clustering of fires at fuel and energy
complex facilities using retrospective statistical
data to identify fires ranks

ВОПРОС – ОТВЕТ

QUESTION – ANSWER

А.С. ХАРЛАМЕНКОВ
Оценка пожарного риска на автостоянках
с наличием мест для зарядки электромобилей

94

A.S. KHARLAMENKOV
Fire risk assessment in car parks
with electric vehicle charging facilities

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

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



Защита лестничных клеток от распространения пожара

Стр. 5



Стр. 15

Расчет параметров потоков при аварийных взрывах



Влияние старения бумаги на ее термическую устойчивость

Стр. 36



Стр. 83

Кластеризация пожаров в топливно-энергетическом комплексе

Стр. 94



Оценка пожарного риска на автостоянках для электромобилей

No. **1** VOL. **33**
2024

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

SCIENTIFIC AND TECHNICAL JOURNAL

EXPLOSION



**FIRE AND
SAFETY**

POZHAROVZRYVOBEZOPASNOST

FOUNDER and PUBLISHER —

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

Address:

26 Yaroslavskoe shosse, Moscow,
129337, Russia

Journal founded in 1992,
issued 6 times per year.

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

DOI prefix: 10.22227.

EDITORIAL STAFF:

Executive editor **Dyadicheva A.A.**

Editor **Korzukhina L.B.**

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

Corrector **Ermikhina O.V.**

Layout **Aleynikova Y.Z.**

Address of Editorial Staff:

26 Yaroslavskoe shosse, Moscow,
129337, Russia

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

E-mail: info@fire-smi.ru

https://www.fire-smi.ru

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

No part of this publication may be used
or reproduced in any form or by any means
without the prior permission of the Publishers.
Reproducing any part of this material a reference
to the journal is obligatory.
Authors and advertisers account for contents
of given papers and for publishing in the open
press.
Opinion of Editorial Staff not always coincides with
Author's opinion.

Signed for printing 26.02.2024.

Date of publication 29.02.2024.

Format is 60 × 84 1/8.

Printing is 2000 copies.

Chalk-overlay mat paper.

Offset printing. Free price.

Journal sells subscription.

Printing house of the Publishing house

MISI – MGSU

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

EDITOR-IN-CHIEF:

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

DEPUTY EDITOR-IN-CHIEF:

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

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

EDITORIAL BOARD:

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

ПОЖАРОВЗРЫВБЕЗОПАСНОСТЬ/FIRE AND EXPLOSION SAFETY. 2024. Т. 33. № 1. С. 5–14
POZHAROVZRYVOBEZOPASNOST/FIRE AND EXPLOSION SAFETY. 2024; 33(1):5-14

НАУЧНАЯ СТАТЬЯ/RESEARCH PAPER

УДК 614.841.332:624.012.4

<https://doi.org/10.22227/0869-7493.2024.33.01.5-14>

Апробация и анализ нормативных требований по защите лестничных клеток с открытыми проемами при распространении пожара по фасаду

Андрей Владимирович Пехотилов, Александр Анатольевич Абашкин,
Александр Васильевич Гомозов ✉, Сергей Алексеевич Лучкин

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

АННОТАЦИЯ

Введение. Положениями Федерального закона Российской Федерации от 22.07.2008 г. № 123-ФЗ «Технический регламент о требованиях пожарной безопасности» предусмотрена возможность проектирования лестничных клеток типа Л1 с открытыми проемами в наружных стенах, а требованиями нормативных документов предусмотрена необходимость расчетного обоснования проектных решений по исключению блокирования лестничных клеток опасными факторами пожара, распространяющимися по фасаду.

Для апробации и анализа этих требований в настоящей статье проведена оценка влияния различных факторов на время блокирования таких лестничных клеток опасными факторами пожара.

Цели и задачи. Целью настоящей статьи является апробация и анализ нормативных требований по защите лестничных клеток с открытыми проемами от блокирования опасными факторами пожара в зависимости от скорости ветра, класса функциональной пожарной опасности горящего помещения, размеров простенков и выступов лестничной клетки, а также конструктивного исполнения окон горящих помещений.

Методы. Расчеты временных интервалов блокирования лестничных клеток опасными факторами пожара, распространяющимися по фасаду из окон горящих помещений, базировались на методологических положениях и математических моделях, используемых для определения пожарного риска.

Результаты. Получены расчетные данные, позволяющие оценить временные интервалы блокирования опасными факторами пожара лестничных клеток с открытыми проемами в наружных стенах в зависимости от скорости ветра в районе размещения объекта, особенностей горючей нагрузки в горящем помещении, размеров простенков и выступов лестничной клетки, а также конструктивного исполнения окон горящих помещений. Эти данные позволили оценить необходимость уточнения нормативных требований.

Выводы. На основе исследований получены расчетные данные для формирования необходимого практического опыта обоснования требований по исключению блокирования лестничных клеток с открытыми проемами опасными факторами пожара, которые распространяются по фасаду из окон горящих помещений. Полученные данные позволяют оценить влияние скорости ветра, класса функциональной пожарной опасности горящего помещения, размера выступа лестничной клетки на время ее блокирования опасными факторами пожара, а также определить направления уточнения нормативных требований.

Ключевые слова: размер простенка; размер выступа; предельные значения; опасные факторы пожара; помещение с естественным проветриванием

Для цитирования: Пехотилов А.В., Абашкин А.А., Гомозов А.В., Лучкин С.А. Апробация и анализ нормативных требований по защите лестничных клеток с открытыми проемами при распространении пожара по фасаду // Пожаровзрывобезопасность/Fire and Explosion Safety. 2024. Т. 33. № 1. С. 5–14. DOI: 10.22227/0869-7493.2024.33.01.5-14

✉ Гомозов Александр Васильевич, e-mail: Gomozovav@yandex.ru

Approbation and analysis of regulatory requirements for protection of stairwells with open doorways in case of fire propagation along the facade

Andrey V. Pekhotikov, Alexander A. Abashkin, Alexander V. Gomozov ✉, Sergey A. Luchkin

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

ABSTRACT

Introduction. The provisions of the Federal Law of the Russian Federation dated 22.07.2008 No. 123-FZ "Technical Regulations on Fire Safety Requirements" stipulate the possibility of designing L1 type stairwells with open doorways in external walls. The requirements of regulatory documents stipulate the necessity of calculation substantiation of design solutions to exclude blocking of stairwells by fire hazardous factors spreading along the facade. To test and analyze these requirements, this paper assesses the influence of different factors on the time of blocking of such stairwells by fire hazardous factors.

Goals and objectives. The purpose of this paper is to approve and analyze regulatory requirements for the protection of stairwells with open doorways from blocking by fire hazardous factors depending on the wind speed, the functional fire hazard class of the burning premises, the dimensions of partitions and projections of the stairwell, as well as the design of the windows of the burning premises.

Methods. Calculations of time intervals of stairwell blocking by fire hazardous factors spreading along the facade from the windows of burning premises were based on methodological provisions and mathematical models used to determine fire risk.

Results. The calculated data allowing to estimate time intervals of blocking stairwells with open doorways in external walls by fire hazardous factors depending on the wind speed in the area of object location, peculiarities of combustible load in the burning premises, sizes of partitions and projections of the stairwell, as well as the design of windows of burning premises were obtained. These data made it possible to assess the necessity of specifying regulatory requirements.

Conclusions. Based on the research, calculated data for formation of necessary practical experience of substantiation of the requirements on exclusion of stairwells blocking with open doorways by fire hazardous factors that spread along the facade from the windows of burning premises are received. The obtained data make it possible to evaluate the influence of wind speed, the functional fire hazard class of burning premises, the size of the stairwell projection on the time of its blocking by fire hazardous factors, as well as to determine the directions of specification of regulatory requirements.

Keywords: partition size; projection size; limit values; fire hazardous factors; naturally ventilated premises

For citation: Pekhotikov A.V., Abashkin A.A., Gomofov A.V., Luchkin S.A. Approbation and analysis of regulatory requirements for protection of stairwells with open doorways in case of fire propagation along the facade. *Pozharovzryvobezopasnost/Fire and Explosion Safety*. 2024; 33(1):5-14. DOI: 10.22227/0869-7493.2024.33.01.5-14 (rus).

✉ Alexander Vasilievich Gomofov, e-mail: Gomofovav@yandex.ru

Введение

Положениями нормативных документов в области пожарной безопасности предусмотрен комплекс требований, направленных на ограничение распространения опасных факторов пожара (ОФП) по фасаду здания из окон горящих помещений в наружную воздушную зону, а также в проемы лестничных клеток.

Применительно к незадымляемым лестничным клеткам типа Н1 данные требования подробно и детально изложены в [1].

Применительно к лестничным клеткам типа Л1, Н2 и Н3 перечисленные требования изложены в [2] в виде требований к ширине простенков — глухих участков наружной стены с нормируемым пределом огнестойкости, расположенных между смежными по горизонтали проемами (оконными или иными проемами) или участками светопрозрачной конструкции с ненормируемым пределом огнестойкости.

Положения Технического регламента о требованиях пожарной безопасности — Федеральный закон Российской Федерации от 22 июля 2008 г. № 123-ФЗ (далее № 123-ФЗ) — предусматривают возможность проектирования лестничных клеток типа Л1 с открытыми проемами в наружных стенах.

Очевидно, что применение подобных лестничных клеток наиболее вероятно в ПБ клима-

тическом подрайоне РФ (Краснодарский край, Астраханская область, Республика Крым, Кабардино-Балкария и др.), где согласно [3] допускается вместо обычных лестничных клеток устройство эвакуационных наружных открытых лестниц (кроме зданий стационарных лечебных учреждений и зданий класса Ф4.1).

С учетом недостаточного опыта проектирования таких лестничных клеток Положениями [2] предусмотрена необходимость обеспечить минимальное расстояние от открытых проемов этих лестничных клеток до оконных и дверных проемов, не имеющих противопожарного заполнения, а также до конструкций, выполненных из горючих материалов, не менее 6 м. Если это расстояние менее 6 м, то необходимо проводить обоснование принятых решений по исключению блокирования лестничных клеток опасными факторами пожара путем проведения расчетов пожарного риска или натурных испытаний в соответствии с [4].

Данные требования предполагают возможность обоснования размеров простенков между проемами лестничных клеток и проемами помещений на основе расчетов временных интервалов блокирования лестничных клеток ОФП и эвакуации людей, проводимых по методикам, используемым для расчетов пожарного риска [5].

Вместе с тем отсутствует необходимая апробация данного подхода, т.е. отсутствует необходимая практика проведения подобных расчетов, толкования и практического применения их результатов, которая позволит проанализировать и уточнить эти требования, а также оптимизировать их в необходимых случаях в части требований к минимальным — необходимым размерам простенков, при которых не требуется проводить обоснования на основе расчетов пожарного риска и т.д.

В частности, корректность требования о возможности не проводить необходимые обоснования при расстоянии не менее 6 м должна быть проанализирована с учетом следующих факторов.

На распространение ОФП по фасаду здания из окон горящих помещений в оконные проемы лестничных клеток существенным образом влияет скорость ветра. Традиционно, на основании Положений [1], расчет параметров противодымной вентиляции проводится с учетом температуры наружного воздуха и скорости ветра для холодного периода года по [6]. Поэтому требования к размерам простенков необходимо проанализировать с учетом возможной скорости ветра в районе размещения объекта.

Очевидно также, что минимально-допустимое значение размера простенка зависит от класса функциональной пожарной опасности горящих помещений, т.е. от вида и количества пожарной нагрузки в горящих помещениях.

Кроме того, изложенное в [2] требование о необходимости обеспечить фиксированное расстояние не менее 6 м не учитывает влияния выступов наружных стен лестничных клеток с открытыми оконными проемами относительно фасада здания, т.е. регламентирует только требования к ширине простенка для плоского фасада без выступов. Вместе с тем, на практике, во многих случаях лестничные клетки проектируются выступающими относительно фасада здания таким образом, что плоскость проемов лестничной клетки параллельна плоскости основного фасада здания и выступает относительно нее. Это обуславливает необходимость анализа влияния выступов лестничных клеток на время их блокирования ОФП.

Необходимо также учитывать, что время блокирования лестничных клеток ОФП существенным образом зависит от конструктивного исполнения окон в горящих помещениях.

Согласно нормативным требованиям, использование неоткрывающихся огнестойких противопожарных окон 2-го типа в зданиях I степени огнестойкости и 3-го типа в остальных зданиях позволяет не нормировать ширину простенка.

Однако использование неоткрывающихся неогнестойких окон в горящих помещениях позволяет увели-

чить время блокирования лестничной клетки за счет того, что разрушение оконного остекления и распространение ОФП на фасад произойдет с некоторой задержкой.

Данный эффект не отражен в [5], что осложняет применение этой методики для поставленной задачи при неоткрывающихся окнах горящих помещений.

Помещение с неоткрывающимися окнами рассматривается как помещение без естественного проветривания. Для таких помещений (общественных, административно-бытовых и производственных), согласно [7], необходимо реализовать достаточно дорогостоящие и сложные мероприятия по устройству в них систем кондиционирования и общеобменной вентиляции.

Поэтому применение неоткрывающихся окон не может рассматриваться как универсальный способ защиты лестничной клетки.

При анализе возможности применения неоткрывающихся окон в жилых зданиях необходимо также учитывать Положения [8], согласно которым применение неоткрывающихся створок в оконных блоках помещений жилых зданий выше первого этажа не допускается, кроме створок с размерами, не превышающими 400×800 мм, а также в изделиях, выходящих на балконы (лоджии) при наличии в таких конструкциях устройств для проветривания помещений.

Поэтому применение окон с неоткрывающимися створками исключено в квартирах жилых зданий, расположенных выше 1-го этажа, и ограничено экономическими и техническими факторами в общественных, административно-бытовых и производственных помещениях.

На основе вышеизложенного эффект влияния неоткрывающихся окон в горящих помещениях в настоящей статье не анализировался.

Необходимо также принимать во внимание, что окна с открывающимися створками могут периодически находиться в открытом положении. В этом случае блокирование лестничной клетки опасными факторами пожара, распространяющимися по фасаду здания из окон горящих помещений, произойдет наиболее быстро.

С учетом этого целью настоящей статьи является апробация нормативных требований [2] в части ограничения блокирования ОФП лестничных клеток с открытыми оконными проемами продуктами горения, распространяющимися по фасаду здания из окон горящих помещений, позволяющая проанализировать влияние возможной скорости ветра в районе размещения объекта, особенностей горючей нагрузки горящего помещения, класса функциональной пожарной опасности горящего помещения, наличия выступа лестничной клетки, а также конструктивного испол-

нения окон горящих помещений с естественной вентиляцией.

Используемые методологические положения и условия однозначности

Нормативные требования [2] предусматривают возможность обоснования принятых проектных решений по исключению блокирования лестничных клеток опасными факторами пожара, распространяющимися по фасаду, на основе методологических положений, используемых при проведении расчетов пожарного риска, что предполагает, в том числе, необходимость определения времени блокирования лестничной клетки опасными факторами.

Распространение опасных факторов пожара из горящего помещения в лестничную клетку может быть спрогнозировано на основе математических моделей отечественных исследователей [9–12], а также соответствующих работ зарубежных авторов [13–19] и др.

При этом для определения предельно-допустимых для людей значений опасных факторов пожара могут быть использованы данные [5, 20, 21].

Вместе с тем регламентируемая [2] необходимость проведения обоснования на основе базовых положений методики расчета пожарного риска предполагает использование для указанных выше целей Положений [5].

Согласно [5], безопасная эвакуация по лестничной клетке считается обеспеченной при условии, что опасные факторы пожара на всем пути эвакуации людей по лестничной клетке до выхода наружу не превышают предельно допустимых значений.

Данное условие описывается соотношением:

$$0,8 t_{\text{бл.лк}} \geq t_{\text{н.э}} + t_{\text{р}}, \quad (1)$$

где $t_{\text{бл.лк}}$ — время блокирования лестничной клетки ОФП, определяемое на основе Положений [5] и анализируемое в статье:

$$t_{\text{бл.лк}} = \min \{ t_{\text{кр}}^{\text{п.в}}, t_{\text{кр}}^{\text{т}}, t_{\text{кр}}^{\text{т.г}}, t_{\text{кр}}^{\text{O}_2}, t_{\text{кр}}^{\text{т.п}} \}; \quad (2)$$

$t_{\text{н.э}}$ и $t_{\text{р}}$ — время начала эвакуации и расчетное время эвакуации, определяемые согласно [5]. С учетом цели статьи данные параметры не анализировались.

Анализируемое в статье значение $t_{\text{бл.лк}}$ определялось с использованием полевого метода моделирования пожара.

На основании результатов расчетов осуществляется построение полей опасных факторов пожара и определяется значение времени блокирования лестничной клетки ОФП $t_{\text{бл.лк}}$.

Предельно допустимые значения по каждому из опасных факторов пожара принимались согласно [5].

Расчеты проводились при следующих условиях однозначности.

При расчетах времени блокирования лестничных клеток $t_{\text{бл.лк}}$ принималось, что непосредственного газодинамического сообщения горящего помещения с лестничной клеткой нет, т.е. блокирование лестничной клетки опасными факторами пожара происходит только за счет распространения ОФП из окна

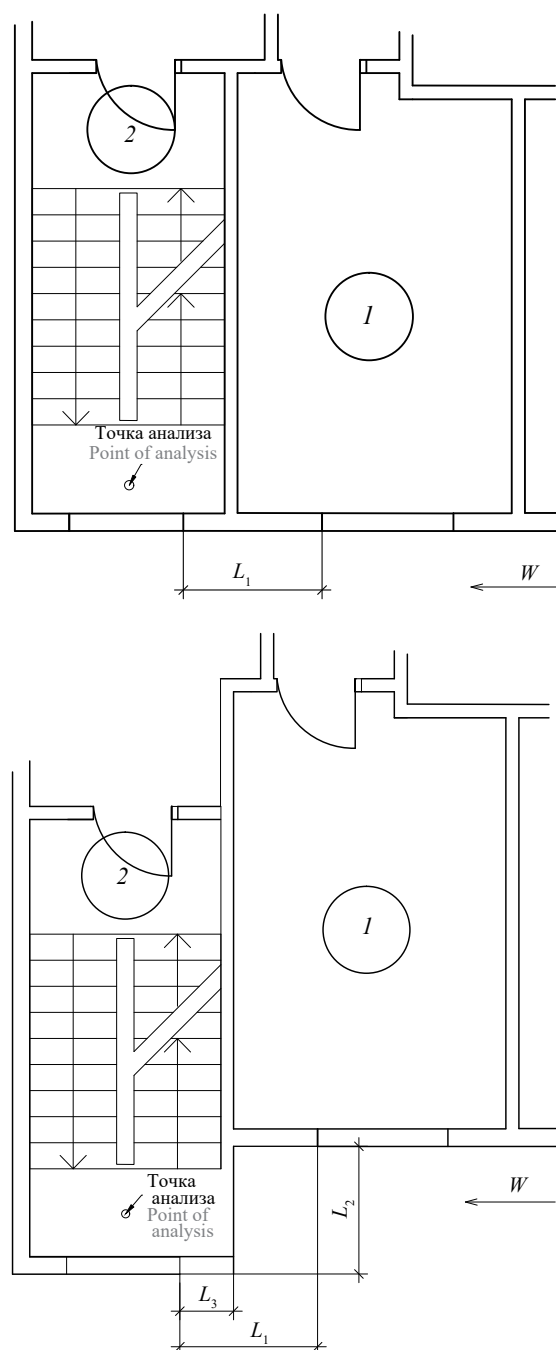


Рис. 1. Анализируемая схема помещения очага пожара и лестничной клетки: 1 — помещение очага пожара; 2 — лестничная клетка; L_1 — простенок; L_2 — выступ; $L_3 = 0,6$ м; W — скорость ветра

Fig. 1. Analyzed scheme of the fire centre premises and stairwell: 1 — fire centre premises; 2 — stairwell; L_1 — partition; L_2 — projection; $L_3 = 0.6$ m; W — wind velocity

горящего помещения в лестничную клетку по фасаду здания (рис. 1).

Кроме того, при расчетах принималось, что наружные стены зданий, вдоль которых распространяются продукты горения, выполнены из негорючих материалов.

При расчетах значения скорости ветра принимались равными $W = 2$ м/с (г. Нальчик), $W = 4$ м/с (г. Астрахань) и $W = 6,2$ м/с (г. Симферополь), т.е. скорость ветра варьировалась в наиболее характерном диапазоне, установленном для ПБ климатического подрайона РФ согласно [6].

Согласно Положениям [5], при расчетах должны рассматриваться сценарии пожара, при которых реализуются наихудшие условия для обеспечения безопасности людей.

С учетом этого направление ветра принималось вдоль фасада здания от окна горящего помещения к лестничной клетке, что соответствует наиболее критичным условиям.

Кроме того, принималось, что при пожаре в жилых и общественных помещениях с естественным проветриванием створки окон имеют открытое положение.

Основные результаты расчетов и их обсуждение

Расчеты временных интервалов блокирования лестничных клеток при распространении ОФП по фасаду проведены для лестничных клеток типа Л1 с открытыми проемами для случаев пожара в жилых помещениях, а также в общественных помещениях — магазине и хранилище библиотеки.

Свойства горючей нагрузки в помещении очага пожара принимались по данным, указанным в Приложении № 9 к [5].

Расчеты охватывали необходимый для практики диапазон изменений размеров простенков L_1 , выступов L_2 и скоростей ветра W .

При расчетах принималось, что очаг пожара находится в помещении площадью 18 м^2 с открытыми створками окна с общей площадью проема в свету $F = 1,2 \times 1,4 \text{ м}^2$ (см. рис. 1).

Площадь открытых проемов в наружных стенах лестничной клетки принималась $S = 1,2 \text{ м}^2$ ($1 \times 1,2 \text{ м}$) на каждом этаже.

Значения ОФП анализировались в точке, расположенной на высоте $1,7 \text{ м}$ от центра площадки лестничной клетки, расположенной у оконного проема (см. рис. 1).

Расстояние между углом выступа лестничной клетки и проемом принималось равным $L_3 = 0,6 \text{ м}$.

На основе анализа результатов расчетов динамики изменения ОФП в лестничной клетке построены графики зависимости времени ее блокирования

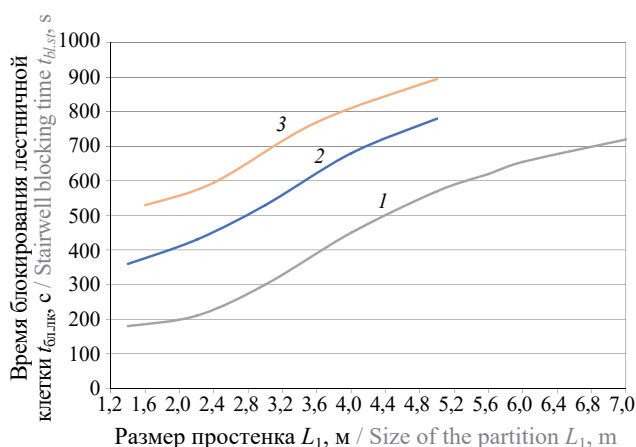


Рис. 2. Зависимость времени блокирования лестничной клетки $t_{\text{бл.лк}}$ от размера простенка L_1 при пожаре в жилом помещении и скорости ветра $W = 2$ м/с: 1 — при плоском фасаде ($L_2 = 0$); 2 — при выступе $L_2 = 1,6 \text{ м}$; 3 — при выступе $L_2 = 2,2 \text{ м}$

Fig. 2. Dependence of the stairwell blocking time $t_{\text{bl,st}}$ on the size of the partition L_1 in case of a fire in a residential area and wind speed $W = 2$ m/s: 1 — with a flat facade ($L_2 = 0$); 2 — with projection $L_2 = 1.6 \text{ m}$; 3 — with projection $L_2 = 2.2 \text{ m}$

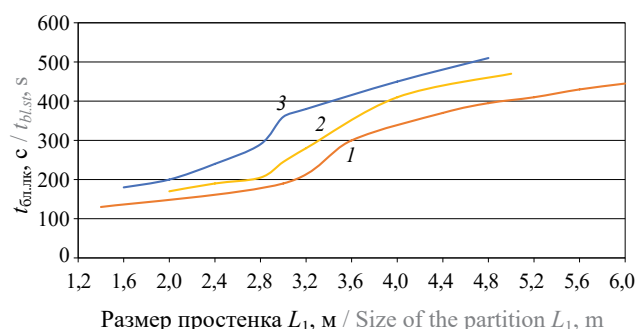


Рис. 3. Зависимость времени блокирования лестничной клетки $t_{\text{бл.лк}}$ от размера простенка L_1 при пожаре в жилом помещении и скорости ветра $W = 4$ м/с: 1 — при плоском фасаде ($L_2 = 0$); 2 — при выступе $L_2 = 1,6 \text{ м}$; 3 — при выступе $L_2 = 2,2 \text{ м}$

Fig. 3. Dependence of the stairwell blocking time $t_{\text{bl,st}}$ on the size of the partition L_1 in case of a fire in a residential area and wind speed $W = 4$ m/s: 1 — with a flat facade ($L_2 = 0$); 2 — with projection $L_2 = 1.6 \text{ m}$; 3 — with projection $L_2 = 2.2 \text{ m}$

от архитектурных особенностей (размера простенка L_1 и выступа L_2), скорости ветра W и вида помещения очага пожара, которые приведены на рис. 2–5.

Расчеты показали, что продолжительность блокирования, т.е. продолжительность заполнения лестничной клетки ОФП, зависит от скорости переноса продуктов горения из горящего помещения внешним потоком воздуха (ветром).

В частности, анализ рис. 2–4 показывает, что на плоском фасаде ($L_2 = 0$) фактор скорости ветра оказывает значительное влияние на время блокирования лестничной клетки ОФП.

Так, в случае пожара в квартире, при ширине простенка $L_1 = 4 \text{ м}$ и скорости ветра $W = 2$ м/с, время блокирования лестничной клетки будет равно $t_{\text{бл.лк}} = 460 \text{ с}$, а при скорости ветра $W = 4$ м/с и $W = 6$ м/с время бло-

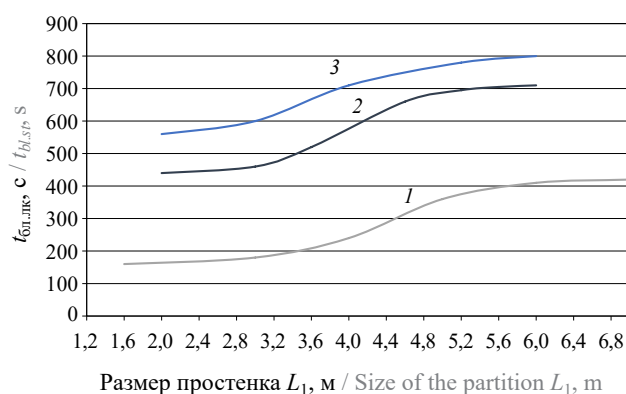


Рис. 4. Зависимость времени блокирования лестничной клетки $t_{\text{бл.лк}}$ от размера простенка L_1 при пожаре в жилом помещении и скорости ветра $W = 6$ м/с: 1 — при плоском фасаде ($L_2 = 0$); 2 — при выступе $L_2 = 1,6$ м; 3 — при выступе $L_2 = 2,2$ м
Fig. 4. Dependence of the stairwell blocking time $t_{\text{bl,st}}$ on the size of the partition L_1 in case of a fire in a residential area and wind speed $W = 6$ m/s: 1 — with a flat facade ($L_2 = 0$); 2 — with projection $L_2 = 1.6$ m; 3 — with projection $L_2 = 2.2$ m

кирования будет равно $t_{\text{бл.лк}} = 340$ с и $t_{\text{бл.лк}} = 240$ с соответственно (кривая 1 на рис. 2–4).

Расчеты также показывают, что на время блокирования лестничной клетки существенным образом влияет особенность горючей нагрузки в помещении очага пожара (т.е. класса функциональной пожарной опасности помещения).

Так, при ширине простенка $L_1 = 3$ м на плоском фасаде ($L_2 = 0$) в случае пожара в жилом помещении при скорости ветра $W = 6$ м/с время блокирования будет равно $t_{\text{бл.лк}} = 185$ с, а при пожаре в книгохранилище библиотеки для аналогичных значений размера простенка и скорости ветра время блокирования будет равно $t_{\text{бл.лк}} = 365$ с (кривая 1 на рис. 4 и кривая 3 на рис. 5).

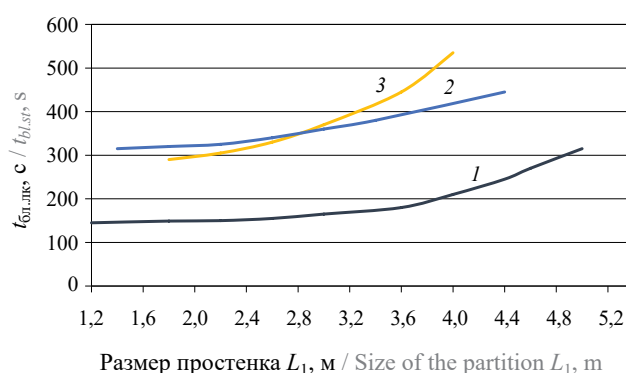


Рис. 5. Зависимость времени блокирования лестничной клетки $t_{\text{бл.лк}}$ от размера простенка L_1 : 1 — при пожаре в магазине, скорости ветра $W = 5$ м/с и плоском фасаде ($L_2 = 0$); 2 — при пожаре в магазине, скорости ветра $W = 5$ м/с и выступе $L_2 = 1,6$ м; 3 — при пожаре в библиотеке, скорости ветра $W = 6$ м/с и плоском фасаде ($L_2 = 0$)
Fig. 5. Dependence of the stairwell blocking time $t_{\text{bl,st}}$ on the size of the partition L_1 : 1 — in case of a fire in a store, wind speed $W = 5$ m/s and a flat facade ($L_2 = 0$); 2 — in case of a fire in a store, wind speed $W = 5$ m/s and projection $L_2 = 1.6$ m; 3 — in case of a fire in the library, wind speed $W = 6$ m/s and a flat facade ($L_2 = 0$)

Так, при ширине простенка $L_1 = 3$ м на плоском фасаде ($L_2 = 0$) в случае пожара в магазине при скорости ветра $W = 5$ м/с время блокирования будет равно $t_{\text{бл.лк}} = 185$ с, а при пожаре в библиотеке при скорости ветра $W = 6$ м/с время блокирования будет равно $t_{\text{бл.лк}} = 365$ с (кривая 1 на рис. 4 и кривая 3 на рис. 5).

Это подтверждает необходимость учета особенностей горючей нагрузки в помещении очага пожара (т.е. класса функциональной пожарной опасности помещения) при формировании требований к размеру простенка.

Необходимо также отметить, что Положения [2] предусматривают необходимость обоснования расчетами риска размеров простенков при размере простенка менее 6 м. Это предполагает возможность не проводить расчетные обоснования при размере простенка более 6 м.

Проанализируем сценарий пожара в жилом помещении при размере простенка $L_1 = 6,5$ м. Если здание находится в Симферополе, для которого скорость ветра необходимо принимать $W = 6,2$ м/с, то время блокирования будет составлять $t_{\text{бл.лк}} = 405$ с (кривая 1 на рис. 4).

Вместе с тем, если время начала эвакуации из здания, определенное согласно [5], будет составлять $t_{\text{н.э}} = 6$ мин, то полное время эвакуации ($t_p + t_{\text{н.э}}$) по лестничной клетке также будет более 6 мин, т.е. $t_p + t_{\text{н.э}} > 360$ с. При этом для выполнения условия $0,8 t_{\text{бл.лк}} > t_p + t_{\text{н.э}}$ время блокирования лестничной клетке должно отвечать условию $t_{\text{бл.лк}} >> 450$ с.

Но для анализируемого здания, находящегося в Симферополе и имеющего размер простенка $L_1 = 6,5$ м, рассчитанное время блокирования составляет $t_{\text{бл.лк}} = 405$ с. Таким образом, не выполняется условие (1), т.е. размер простенка $L_1 \geq 6$ для данного случая не обеспечивает условия безопасной эвакуации, а нормативные требования [2] о минимально-необходимом размере простенка, равном 6 м, не представляются корректными.

Таким образом, проведенный анализ показывает необходимость уточнения Положений [2] в части минимально-допустимого размера простенка, при котором не требуется проведения необходимых обоснований принятых решений по исключению блокирования лестничных клеток опасными факторами пожара.

Анализируемые нормативные требования также не учитывают фактор наличия выступов лестничных клеток.

Вместе с тем расчеты показали, что выступ лестничной клетки позволяет значительно увеличить время ее блокирования при фиксированном размере простенка и скорости ветра, что обусловлено увеличением роли эффекта перемешивания продуктов горения, выходящих из оконного проема, который приводит к снижению концентрации токсичных газов.

Так, при пожаре в квартире, при фиксированном значении ширины простенка $L_1 = 2$ м и скорости ветра $W = 2$ м/с время блокирования лестничной клетки будет равно $t_{\text{бл.лк}} = 190$ с в случае плоского фасада, а при наличии выступов $L_2 = 1,6$ м и $L_2 = 2,2$ м

значение времени блокирования будет составлять $t_{\text{бл.лк}} = 405$ с и $t_{\text{бл.лк}} = 540$ с соответственно (см. рис. 2).

Если скорость ветра будет составлять $W = 4$ м/с, то при фиксированном значении ширины простенка $L_1 = 3$ м время блокирования лестничной клетки будет равно $t_{\text{бл.лк}} = 185$ с в случае плоского фасада, а при наличии выступов $L_2 = 1,6$ м и $L_2 = 2,2$ м значение времени блокирования будет составлять $t_{\text{бл.лк}} = 240$ с и $t_{\text{бл.лк}} = 360$ с соответственно (см. рис. 3).

Аналогичным образом в случае пожара в помещении магазина при скорости ветра $W = 5$ м/с выступ размером $L_2 = 1,6$ м позволяет увеличить время блокирования лестничной клетки до значения $t_{\text{бл.лк}} = 430$ с относительно значения $t_{\text{бл.лк}} = 205$ с при плоском фасаде и фиксированной величине простенка $L_1 = 4$ м (кривые 1, 2 на рис. 5).

С учетом этого в нормативных требованиях необходимо дополнительно отразить фактор наличия выступов лестничных клеток, в том числе его влияние на минимально-необходимый размер простенка, при котором не требуется проводить расчеты пожарного риска.

Выводы

Положения № 123-ФЗ предусматривают возможность проектирования лестничных клеток типа Л1 с открытыми проемами в наружных стенах. С учетом отсутствия достаточного опыта проектирования таких лестничных клеток требованиями нормативных документов регламентируется необходимость обеспечить фиксированное минимально-необходимое расстояние 6 м от проемов этих лестничных клеток до оконных и дверных проемов помещений, а в противном случае — проводить обоснование принятых решений по исключению блокирования лестничных клеток опасными факторами пожара путем проведения расчетов пожарного риска или натурными испытаниями.

Возможность обоснования принятых проектных решений расчетами пожарного риска обеспечивает наиболее рациональный подход к решению данной проблемы.

Однако в настоящее время не проведена необходимая апробация данного подхода, которая позволила бы обеспечить его эффективное применение, а также дополнить или оптимизировать существующие нормативные требования.

Для формирования необходимого практического опыта применения указанных нормативных требований в рамках статьи проведены расчеты динамики изменения опасных факторов пожара в лестничной клетке при распространении пожара по фасаду из окон горящих помещений в жилых и общественных зданиях.

Расчеты базировались на базовых положениях методики определения пожарного риска в части

использованной математической модели, предельно-допустимых для людей значения ОФП, а также рассмотрения сценариев пожара, при которых реализуются наихудшие условия для обеспечения безопасности людей.

Проанализировано влияние скорости ветра в районе размещения объекта, класса функциональной пожарной опасности горящего помещения, а также размера выступа лестничной клетки на время ее блокирования опасными факторами пожара, распространяющимися по фасаду здания из окон горящих помещений.

Так, расчеты показали, что при увеличении скорости ветра время блокирования лестничной клетки, расположенной на фиксированном расстоянии от окна горящего помещения, может существенно уменьшиться. В частности, в случае пожара в жилом помещении, при увеличении скорости ветра от 2 до 6 м/с время блокирования лестничной клетки уменьшается на 40 %.

На основе результатов расчетов установлено, что нормативное требование о фиксированном, минимально-необходимом размере простенка, при котором не требуется подтверждать расчетными обоснованиями возможность блокирования лестничной клетки ОФП, должно быть откорректировано с учетом скорости ветра в районе размещения объекта.

Нормативные требования не учитывают фактор наличия выступов лестничных клеток, которые, как показали расчеты, позволяют значительно увеличить время их блокирования.

В частности, при пожаре в жилом здании при скорости ветра 2 м/с наличие выступа размером не менее 1,6 м позволяет увеличить время блокирования лестничной клетки более чем в 2 раза.

А в случае пожара в магазине при скорости ветра 5 м/с наличие выступа размером не менее 1,6 м позволяет увеличить время блокирования лестничной клетки практически в 2 раза.

С учетом этого в нормативных требованиях необходимо дополнительно отразить фактор наличия выступов лестничных клеток, в том числе его влияние на минимально-необходимый размер простенка, при котором не требуется проводить расчеты пожарного риска.

Полученные результаты работ являются основой для формирования необходимого практического опыта обоснования требований по исключению блокирования лестничных клеток с открытыми проемами опасными факторами пожара, которые распространяются по фасаду из окон горящих помещений. Данные результаты показывают необходимость уточнения соответствующих нормативных требований в новых редакциях сводов правил по пожарной безопасности.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

- СП 7.13130.2013. Отопление, вентиляция и кондиционирование. Противопожарные требования. Изменение № 1. URL: www.standards.ru
- СП 2.13130.2020. Системы противопожарной защиты. Обеспечение огнестойкости объектов защиты. URL: www.standards.ru
- СП 1.13130.2020. Системы противопожарной защиты. Эвакуационные пути и выходы. URL: www.standards.ru
- ГОСТ Р 53309. Здания и фрагменты зданий. Метод натурных огневых испытаний. Общие требования.
- Методика определения расчетных величин пожарного риска в зданиях, сооружениях и пожарных отсеках различных классов функциональной пожарной опасности (в ред. приказа МЧС от 14.11.2022 № 1140). URL: www.standards.ru
- СП 131.13330.2020. Строительная климатология.
- СП 60.13330.2020. Отопление, вентиляция и кондиционирование.
- ГОСТ 23166–2021. Конструкции оконные и балконные светопрозрачные ограждающие.
- Ярош А.С., Чалаташвили М.Н., Кроль А.Н., Попова Е.А., Романова В.В., Сачков А.В. Анализ математических моделей развития опасных факторов пожара в системе зданий и сооружений // Вестник научного центра по безопасности работ в угольной промышленности. 2019. № 1. С. 50–56.
- Дроздов Д.С., Дроздова Т.И. Графическое моделирование для оценки опасных факторов пожара // Технологическая и природная безопасность : сб. науч. тр. V междунар. науч.-практ. конф. Саратов, 24–26 апреля 2019 г. / под ред. С.М. Рогачевой, А.С. Жутова, И.М. Учайевой. Саратов : Амирит, 2019. С. 69–73.
- Бедрина Е.А., Рекин А.С., Храпский С.Ф., Бокарев А.И., Денисова Е.С. Прогнозирование динамики тепло-массообменных процессов при пожарах в типовых многоэтажных жилых зданиях // Динамика систем, механизмов и машин. 2019. Т. 7. № 3. С. 10–15. DOI: 10.25206/2310-9793-7-3-10-15
- Хасанов И.Р., Зуев С.А., Абаишкин А.А., Зуева А.С. Распространение пожара из открытой автостоянки, расположенной на первом этаже жилого здания // Пожаровзрывобезопасность/Fire and Explosion Safety. 2022. Т. 31. № 1. С. 77–87. DOI: 10.22227/0869-7493.2022.31.01.77-87
- McGrattan K., Miles S. Modeling fires using Computational Fluid Dynamics (CFD). SFPE Handbook of Fire Protection Engineering. Chapter 32. Fifth Edition // Society of Fire Protection Engineers. 2016. Pp. 1034–1065. DOI: 10.1007/978-1-4939-2565-0
- Nuclear Safety NEA/CSNI/R Investigating heat and smoke propagation mechanisms in multi-compartment fire scenarios. Final Report of the PRISME Project. 14.01.2018.
- McGrattan K., Hostikka S., McDermott R. et al. Fire dynamics simulator user's guide. National Institute of Standards and Technology, 2019. 288 p. URL: <https://www.thunderheadeng.com/wpcontent/uploads/2013/08/FDS>
- Gilbert S. Human Behavior in Home Fires, Technical Note (NIST TN). National Institute of Standards and Technology, Gaithersburg, MD, 2021. 28 p. DOI: 10.6028/NIST.TN.2191
- Zhang T., Wang Z., Wong H., Tam W., Huang X., Xiao F. Real-time forecast of compartment fire and flashover based on deep learning // Fire Safety Journal. 2022. No. 130. P. 103579. DOI: 10.1016/j.firesaf.2022.103579
- Cortés D., Gil D., Azorín J., Vandecasteele F., Verstockt S. A review of modelling and simulation methods for flashover prediction in confined space fires // Applied Sciences (Switzerland). 2020. No. 10 (16). P. 5609. DOI: 10.3390/app10165609
- Wu X., Zhang X., Huang X., Xiao F., Usmani A. A real-time forecast of tunnel fire based on numerical database and artificial intelligence // Building Simulation. 2022. No. 15. Pp. 511–524. DOI: 10.1007/s12273-021-0775-x
- Leventon I., Bonny J. Influence of dispositional and situational factors on human perceptions of fire Risk. Interflam 2019. London. DOI: 10.1002/fam.2857
- Gwynne S., Kuligowski E., Kinsey M., Hulse L. Modelling and Influencing Human Behaviour in Fire // Fire and Materials. 2017. Vol. 41. Issue 5. DOI: 10.1002/fam.2391

REFERENCES

- SP 7.13130.2013. *Heating, ventilation and air conditioning. Fire safety requirements*. Change No. 1. URL: www.standards.ru
- SP 2.13130.2020. *Fire protection systems. Ensuring the fire resistance of objects of protection*. Change 1. URL: www.standards.ru
- SP 1.13130.2020. *Fire protection systems. Evacuation routes and exits*. URL: www.standards.ru
- GOST R 53309. *Buildings and fragments of buildings. Method of full-scale fire tests. General requirements*.
- Methodology for determining the calculated values of fire risk in buildings, structures and fire compartments of various classes of functional fire hazard* (ed. dated 11.14.2022 No. 1140). URL: www.standards.ru
- SP 131.13330.2020. *Construction climatology*.

7. SP 60.13330.2020. *Heating, ventilation and air conditioning*.
8. GOST 23166–2021. *Window and balcony translucent enclosing structures*.
9. Yarosh A.S., Chalatazhvili M.N., Krol' A.N., Popova E.A., Romanova V.V., Sachkov A.V. Analysis of mathematical models for the development of dangerous fire factors in the system of buildings and structures. *Bulletin of the Scientific Center for the Safety of Work in the Coal Industry*. 2019; 1:50-56. (rus).
10. Drozdov D.S., Drozdova T.I. Graphic modeling for assessing fire hazards. *Tekhnogennaya i prirodnaya bezopasnost : collection scientific works V international scientific and practical conference. Saratov, April 24–26, 2019*. C.M. Rogacheva, A.S. Zhutova, I.M. Uchaeva (ed.). Saratov, Amirit Publ., 2019; 69-73. (rus).
11. Bedrina E.A., Rekin A.S., Khrapskiy S.F., Bokarev A.I., Denisova E.S. Forecasting the dynamics of heat and mass transfer processes during fires in typical multi-storey residential buildings. *Dynamics of Systems, Mechanisms and Machines*. 2019; 7(3):10-15. DOI: 10.25206/2310-9793-7-3-10-15 (rus).
12. Khasanov I.R., Zuev S.A., Abashkin A.A., Zueva A.S. The spread of fire from an open car park on the ground floor of a residential building. *Pozharovzryvbezopasnost/Fire and Explosion Safety*. 2022; 31(1):77-87. DOI: 10.22227/0869-7493.2022.31.01.77-87 (rus).
13. McGrattan K., Miles S. Modeling fires using Computational Fluid Dynamics (CFD). SFPE Handbook of Fire Protection Engineering. Chapter 32. 5th ed. *Society of Fire Protection Engineers*. 2016; 1034-1065. DOI: 10.1007/978-1-4939-2565-0
14. Nuclear Safety NEA/CSNI/R. Investigating heat and smoke propagation mechanisms in multi-compartment fire scenarios. *Final Report of the PRISME Project*. 14.01.2018.
15. McGrattan K., Hostikka S., McDermott R. et al. *Fire dynamics simulator user's guide*. National Institute of Standards and Technology, 2019; 288. URL: <https://www.thunderheadeng.com/wpcontent/uploads/2013/08/FDS>
16. Gilbert S. *Human Behavior in Home Fires, Technical Note (NIST TN)*. National Institute of Standards and Technology, Gaithersburg, MD, 2021; 28. DOI: 10.6028/NIST.TN.2191
17. Zhang T., Wang Z., Wong H., Tam W., Huang X., Xiao F. Real-time forecast of compartment fire and flashover based on deep learning. *Fire Safety Journal*. 2022; 130:103579. DOI: 10.1016/j.firesaf.2022.103579
18. Cortés D., Gil D., Azorín J., Vandecasteele F., Verstockt S. A review of modelling and simulation methods for flashover prediction in confined space fires. *Applied Sciences (Switzerland)*. 2020; 10(16):5609. DOI: 10.3390/app10165609
19. Wu X., Zhang X., Huang X., Xiao F., Usmani A. A real-time forecast of tunnel fire based on numerical database and artificial intelligence. *Building Simulation*. 2022; 15:511-524. DOI: 10.1007/s12273-021-0775-x
20. Leventon I., Bonny J. *Influence of Dispositional and Situational Factors on Human Perceptions of Fire Risk*. Interflam 2019, London. DOI: 10.1002/fam.2857
21. Gwynne S., Kuligowski E., Kinsey M., Hulse L. Modelling and influencing human behaviour in fire. *Fire and Materials*. 2017; 41(5). DOI: 10.1002/fam.2391

Поступила 22.09.2023, после доработки 20.10.2023;

принята к публикации 11.12.2023

Received September 22, 2023; Received in revised form October 20, 2023;

Accepted December 11, 2023

Информация об авторах

ПЕХОТИКОВ Андрей Владимирович, канд. техн. наук, начальник отдела огнестойкости строительных конструкций и инженерного оборудования, Всероссийский ордена «Знак Почета» научно-исследовательский институт противопожарной обороны Министерства Российской Федерации по делам гражданской обороны, чрезвычайным ситуациям и ликвидации последствий стихийных бедствий, Россия, 143903, Московская обл., г. Балашиха, мкр. ВНИИПО, 12; ORCID: 0000-0003-2396-3136; e-mail: Pekhotikov.a@mail.ru

АБАШКИН Александр Анатольевич, начальник отдела моделирования пожаров и нестандартного проектирования, Всероссийский ордена «Знак Почета» научно-исследовательский институт противопожарной обороны Министерства Российской Федерации по делам гражданской обороны, чрезвычайным ситуациям и ликвидации последствий стихий-

Information about the author

Andrey V. PEKHOTIKOV, Cand. Sci. (Eng.), Head of Department of Fire Resistance of Building Structures and Engineering Equipment, All-Russian Research Institute for Fire Protection of Ministry of Russian Federation for Civil Defense, Emergencies and Elimination of Consequences of Natural Disasters, VNIPO, 12, Balashikha, Moscow Region, 143903, Russian Federation; ORCID: 0000-0003-2396-3136; e-mail: Pekhotikov.a@mail.ru

Alexander A. ABASHKIN, Head of Fire Modeling and Custom Design Department, All-Russian Research Institute for Fire Protection of Ministry of Russian Federation for Civil Defense, Emergencies and Elimination of Consequences of Natural Disasters, VNIPO, 12, Balashikha, Moscow Region, 143903, Russian Federation; ORCID: 0000-0002-6347-3257; e-mail: one_15@bk.ru

ных бедствий, Россия, 143903, Московская обл., г. Балашиха, мкр. ВНИИПО, 12; ORCID: 0000-0002-6347-3257; e-mail: one_15@bk.ru

ГОМОЗОВ Александр Васильевич, канд. техн. наук, старший научный сотрудник отдела огнестойкости строительных конструкций и инженерного оборудования, Всероссийский ордена «Знак Почета» научно-исследовательский институт противопожарной обороны Министерства Российской Федерации по делам гражданской обороны, чрезвычайным ситуациям и ликвидации последствий стихийных бедствий, Россия, 143903, Московская обл., г. Балашиха, мкр. ВНИИПО, 12; ORCID: 0000-0001-9660-9221; e-mail: Gomozovav@yandex.ru

ЛУЧКИН Сергей Алексеевич, младший научный сотрудник отдела огнестойкости строительных конструкций и инженерного оборудования, Всероссийский ордена «Знак Почета» научно-исследовательский институт противопожарной обороны Министерства Российской Федерации по делам гражданской обороны, чрезвычайным ситуациям и ликвидации последствий стихийных бедствий, Россия, 143903, Московская обл., г. Балашиха, мкр. ВНИИПО, 12; ORCID: 0000-0003-2313-6309; e-mail: Luchkin.sergey@yandex.ru

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

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Alexander V. GOMOZOV, Cand. Sci. (Eng.), Senior Researcher, Department of Fire Resistance of Building Structures and Engineering Equipment, All-Russian Research Institute for Fire Protection of Ministry of Russian Federation for Civil Defense, Emergencies and Elimination of Consequences of Natural Disasters, VNIPO, 12, Balashikha, Moscow Region, 143903, Russian Federation; ORCID: 0000-0001-9660-9221; e-mail: Gomozovav@yandex.ru

Sergey Alekseevich LUCHKIN, Junior Researcher, Department of Fire Resistance of Building Structures and Engineering Equipment, All-Russian Research Institute for Fire Protection of Ministry of Russian Federation for Civil Defense, Emergencies and Elimination of Consequences of Natural Disasters, VNIPO, 12, Balashikha, Moscow Region, 143903, Russian Federation; ORCID: 0000-0003-2313-6309; e-mail: Luchkin.sergey@yandex.ru

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

The authors declare no conflicts of interests.

ПОЖАРОВЗРЫВБЕЗОПАСНОСТЬ/FIRE AND EXPLOSION SAFETY. 2024. Т. 33. № 1. С. 15–23
POZHAROVZRYVOBEZOPASNOST/FIRE AND EXPLOSION SAFETY. 2024; 33(1):15-23

НАУЧНАЯ СТАТЬЯ/RESEARCH PAPER

УДК 614.83

<https://doi.org/10.22227/0869-7493.2024.33.01.15-23>

Особенности расчета параметров газодинамических потоков при аварийных взрывах

Александр Андреевич Комаров ✉

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

АННОТАЦИЯ

Введение. Настоящая статья посвящена вопросам, связанным с расчетами газодинамических потоков, возникающих при аварийных взрывах. Актуальность данной публикации связана со следующими обстоятельствами. Динамические параметры взрывных нагрузок обладают достаточно широким диапазоном, который варьируется по длительности и интенсивности от нескольких миллисекунд и сотен атмосфер до нескольких секунд и нескольких процентов от атмосферы, что определяется типом взрывного явления. В связи с этим общая картина разрушений или послеаварийная обстановка значительно различаются в зависимости от параметров взрывной нагрузки, которая зависит от типа аварийного взрыва. По общей картине разрушений можно определить тип аварийного взрыва, для которого расчетным путем могут быть определены параметры газодинамических потоков, сопровождавших аварийный взрыв. Это позволяет восстановить сценарий развития аварийного взрыва, а иногда и сценарий развития всей аварии.

В настоящей статье на примере анализа последствий аварии и выполненных расчетов газодинамических потоков, формирующихся при аварийном взрыве, восстанавливается сценарий развития аварийной ситуации, что позволяет говорить о причинах обрушения строительных конструкций, произошедших в результате аварии, и о степени вины свидетелей аварии.

Материалы и методы. Дается краткое описание расчетных методов, позволяющих проводить вычисления полей взрывного давления, формирующегося при аварийном взрыве, а также разработанных автором методов расчета газодинамических потоков, сопровождающих аварийный взрыв.

Результаты исследования. Рассматриваются и анализируются результаты физического моделирования локальных дефлаграционных взрывов в помещениях, выполненных в лаборатории строительного университета. Проводится анализ сравнения результатов расчета с экспериментальными данными. Приведены результаты расчета параметров взрывного давления и газодинамических потоков, сопровождавших реальную аварийную ситуацию. Результаты расчета позволили с достаточной точностью восстановить сценарий развития аварии, сопровождавшейся взрывом.

Выводы. Показано, что разработанные математические модели достаточно точно описывают поле взрывного давления и газодинамические потоки, создаваемые аварийными взрывами. Расчет газодинамических потоков, сопровождающих аварийный взрыв, позволяет восстановить сценарий его развития. Описаны основные особенности и трудности, возникающие при математическом моделировании и экспериментальных исследованиях взрывных нагрузок, которые формируются при аварийных взрывах.

Показано, что для правильного прогнозирования нагрузок, которые реализуются при аварийных взрывах, необходимо четко и корректно моделировать физические процессы и рассматривать сценарии развития аварийной ситуации, которые наиболее адекватно соответствуют рассматриваемому объекту и окружающей застройке.

Приведены результаты расчета параметров взрывного давления и газодинамических потоков, сопровождающих реальную аварийную ситуацию, а также пример восстановления сценария развития взрывной аварии.

Ключевые слова: дефлаграционный взрыв; газовоздушная смесь; взрывное горение; фронт пламени; взрывное давление; устойчивость зданий при взрывах; сценарий развития аварии

Для цитирования: Комаров А.А. Особенности расчета параметров газодинамических потоков при аварийных взрывах // Пожаровзрывобезопасность/Fire and Explosion Safety. 2024. Т. 33. № 1. С. 15–23. DOI: 10.22227/0869-7493.2024.33.01.15-23.

✉ Комаров Александр Андреевич, e-mail: KomarovAA@mgsu.ru

Analysis of parameters of gas dynamic flows in case of emergency explosions

Alexander A. Komarov ✉

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

ABSTRACT

Introduction. This paper is devoted to the issues related to calculations of gas-dynamic flows arising during emergency explosions. The relevance of this publication is due to the following circumstances. The dynamic parameters of explosive loads have a rather wide range, which varies in duration and intensity from several milliseconds and hundreds of atmospheres to several seconds and several percent of the atmosphere, which is determined by the type of explosive phenomenon. In this regard, the overall picture of destruction or post-accident situation varies significantly depending on the parameters of the explosive load, which depends on the type of emergency explosion. Based on the general picture of destruction, it is possible to determine the type of emergency explosion, for which the parameters of the gas-dynamic flows that accompanied the emergency explosion can be determined by calculation. This makes it possible to reconstruct the scenario of the emergency explosion, and sometimes the scenario of the entire accident.

In the present paper using the example of an analysis of the accident consequences and the performed calculations of the gas-dynamic flows formed during the emergency explosion, the scenario of the emergency situation development is reconstructed, which allows to speak about the causes of the collapse of building structures that occurred as a result of the accident, and about the degree of guilt of the witnesses of the accident.

Materials and methods. A brief description of the calculation methods that makes it possible to calculate the explosive pressure fields formed during the emergency explosion is given. A brief description of the methods developed by the author for calculating gas-dynamic flows accompanying the emergency explosion is given.

Research results. The results of physical modelling of local deflagration explosions in premises, performed in the laboratory of the university of civil engineering, are reviewed and analyzed. An analysis comparing the calculation results with experimental data is carried out. The results of calculation of explosive pressure parameters and gas-dynamic flows accompanying a real emergency situation are presented. The calculation results made it possible to reconstruct with sufficient accuracy the scenario of the accident development accompanied by the explosion.

Conclusions. It is shown that the developed mathematical models quite accurately describe the field of explosive pressure and gas-dynamic flows created by emergency explosions. Calculation of gas-dynamic flows accompanying the emergency explosion makes it possible to reconstruct the scenario of its development. The main features and difficulties arising during mathematical modelling and experimental studies of explosive loads formed during emergency explosions are described.

It is shown that for the correct prediction of loads that are realized during emergency explosions, it is necessary to model physical processes clearly and correctly and to consider scenarios of development of an emergency situation that most adequately correspond to the considered object and the surrounding buildings.

The results of calculation of explosive pressure parameters and gas-dynamic flows accompanying a real emergency situation are presented. An example of reconstructing the development scenario of the explosive accident is given.

Keywords: deflagration explosion; gas-air mixture; explosive combustion; flame front; explosive pressure; stability of buildings during explosions; accident development scenario

For citation: Komarov A.A. Analysis of parameters of gas dynamic flows in case of emergency explosions. *Pozharovzryvobezopasnost/Fire and Explosion Safety*. 2024; 33(1):15-23. DOI: 10.22227/0869-7493.2024.33.01.15-23 (rus).

✉ Alexander Andreevich Komarov, e-mail: KomarovAA@mgsu.ru

Введение

Формирующиеся при аварийных взрывах газодинамические потоки являются основными поражающими и разрушающими факторами, которые характеризуются следующими параметрами: избыточным давлением, скоростным напором, импульсом давления, спектром взрывного давления и т.д. Динамические параметры взрывных нагрузок обладают достаточно широким диапазоном, который варьируется по длительности и интенсивности от нескольких миллисекунд и сотен атмосфер, например, при взрывах конденсированных взрывчатых веществ (ВВ) до нескольких секунд и нескольких процентов от атмосферы, например, при дефлаграционных аварийных взрывах [1–3]. В связи с этим общая картина разрушений или послеаварийная обстановка значительно различаются в зависимости от параметров взрывной нагрузки, которая, в свою очередь, зависит от типа аварийного взрыва.

Поэтому по общей картине разрушений можно определить тип аварийного взрыва, для которого расчетным путем могут быть определены параметры газодинамических потоков, сопровождавших аварийный взрыв [4–6]. Это позволяет определить или восстановить сценарий развития аварийного взрыва. Кроме этого, восстановление сценария развития аварийного взрыва часто позволяет восстановить и предысторию развития всей аварии.

В настоящей статье на примере анализа последствий аварии и выполненных расчетов газодинамических потоков, формирующихся при аварийном взрыве, восстанавливается сценарий развития аварийной ситуации, что позволяет говорить о причинах обрушения строительных конструкций, происшедших в результате аварии, и о степени вины свидетелей аварии.

Как указывалось ранее, взрывные явления характеризуются достаточно широким диапазоном дина-

мических параметров, что связано с различной природой их формирования. Напомним, что аварийные взрывы делятся на физические и химические взрывы [7–9]. При физических взрывах взрывные нагрузки создаются в результате высвобождения энергии сжатых газов или паров, находящихся под давлением в емкости. При химических взрывах происходит химическая реакция (например, окисление), в результате которой выделяется энергия, генерирующая взрывные волны. Химическая реакция может протекать в виде дефлаграции, при которой горение подготовленной к горению смеси происходит за счет теплопроводности, и в детонационном режиме, при котором химическая реакция в смеси происходит в результате ее нагрева при сжатии смеси ударной волной, формирующейся при детонации. При химических взрывах смесь должна находиться в определенных концентрационных пределах (между нижним концентрационным пределом и верхним концентрационным пределом воспламеняемости). При дефлаграционном режиме взрывного горения смеси видимая скорость пламени, как правило, дозвуковая, т.е. меньше, чем скорость звука в среде, а при детонации видимая скорость пламени сверхзвуковая [10]. Дефлаграционный режим взрывного горения может ускоряться и при определенных условиях перейти в детонацию [11–13].

Реализация определенного типа взрыва определяется сценарием развития аварии. При аварии может произойти несколько взрывов различной природы, имеющих разные параметры поражающих факторов, а преобладание того или иного поражающего фактора полностью зависит от начальных и граничных условий, а также от сценария развития аварии. Именно в этом и заключается сложность прогнозирования взрывных нагрузок, формирующихся в результате взрывной аварии. С другой стороны, тип аварийного взрыва полностью определяет сценарий развития аварии и общую картину происшедших разрушений. Поэтому послеаварийная обстановка и имеющиеся данные об аварийном взрыве часто позволяют восстановить сценарий развития взрывной аварии.

Следует выделить аварийные взрывы, происходящие на открытом пространстве (в атмосфере). Такие взрывы часто называют внешними взрывами. И аварийные взрывы, происходящие в помещениях — внутренние взрывы.

Проведение расчетов газодинамических потоков, сопровождающих аварийные взрывы, позволяет не только обосновывать проектные решения, обеспечивающие устойчивость объектов при аварийных взрывах, но и восстанавливать сценарии развития происшедших аварийных ситуаций, что невозможно

делать опираясь на нормативные документы и методики.

Материалы и методы

При дефлаграционных взрывах газопаровоздушных смесей в помещениях и при условии значительной загазованности помещения реализуется так называемый принцип квазистатичности избыточного давления [1]. Данный термин заимствован из термодинамики и может быть сформулирован следующим образом: темп притока или расход чего-либо (тепла, вещества и т.д.) в систему не должен приводить к существенному изменению распределения втекающего продукта по пространству системы. Применительно к газовой динамике это означает, что удельный объемный расход вещества (при взрывах это расход продуктов горения) должен быть значительно меньше, чем расход, создаваемый избыточным давлением, вызванным притоком данного вещества. Другими словами, видимая скорость пламени, характеризующая темп притока продуктов горения, должна быть значительно меньше скорости звука, с которой распространяется избыточное давление. В этом случае избыточное давление зависит от времени, но практически не зависит от пространственной координаты. Полная аналогия с опорожнением бака с водой, когда уровень воды в баке зависит только от времени и практически одинаков по всему зеркалу воды, что связано с относительно малым расходом воды через сливное отверстие. При данном типе взрывной нагрузки в ограждающих помещении конструкциях (стенах, полу, потолке) достаточно четко видны остаточные деформации, которые однозначно указывают на тип аварийного взрыва.

С учетом данной особенности формирования взрывной нагрузки в помещении строится вычислительная схема, которая представляет собой систему дифференциальных уравнений, описывающих зависимости от времени параметров среды и процесса горения (избыточного давления, фронта пламени, видимой скорости пламени...) и параметров, характеризующих процесс разгерметизации объема помещения в результате внутреннего взрыва.

Результаты расчетов по указанной схеме достаточно хорошо совпадают с экспериментальными данными, что указывает на возможность использования данной вычислительной схемы для прогнозирования последствий взрывной аварии или для восстановления сценария уже происшедшей взрывной аварии [1]. Сложности возникают при разработке сценариев развития аварии, которые потом используются при прогнозировании ее последствий. А при восстановлении сценария уже происшедшей взрывной аварии возникают проблемы с заданием исход-

ных и начальных данных, хотя в этом случае значительную помощь оказывает имеющаяся информация о последствиях аварии и информация о событиях, предшествующих аварии.

При математическом моделировании (прогнозировании) последствий аварийных дефлаграционных взрывов в атмосфере или при физическом моделировании (экспериментальных работах) исследователи сталкиваются с рядом трудностей как технического, так и теоретического плана. К проблемам технического характера следует отнести сложность создания облака взрывоопасной смеси с определенными, заранее заданными параметрами, к которым относятся размер и форма облака, а также распределение концентрации горючего вещества по смеси [2]. Из проблем теоретического характера следует выделить вопросы о параметрах взрывоопасного облака и о доли его участия в аварийном взрыве. Если перечисленные вопросы решены, то прогнозирование динамических параметров взрывного давления наиболее целесообразно проводить по соотношениям, описывающим поведение акустического монополя [1, 14]. Опыт показывает, что результаты расчета, выполненные по данной вычислительной схеме, достаточно хорошо совпадают с экспериментальными данными [1, 3].

Описанные выше особенности, связанные с прогнозированием взрывного давления, наиболее ярко прослеживаются при аварийных взрывах локальных взрывоопасных облаков в больших объемах (помещениях).

Рассмотрение вопроса взрыва локального облака в больших помещениях актуально по следующим причинам. При возникновении пожара в большом помещении (например, в помещении склада) и при его задымлении взрыв формирующихся в результате нагрева локальных облаков паров горючих веществ часто не воспринимается свидетелями аварии за взрыв, а воспринимается ими в качестве ветровой нагрузки (порыва ветра). Связано это с особенностями человеческого уха, выполняющего роль датчика давления, которое не воспринимает инфразвуковые колебания, создаваемые аварийным взрывом. Локальная вспышка, создающая инфразвуковые колебания и газодинамические потоки, при этом часто не видна из-за сильного задымления. Вызванные указанным типом взрыва разрушения часто «списывают» на разрушения, вызванные пожаром, или на воздействие динамических нагрузок, сопровождающих обрушение строительных конструкций при аварии.

Результаты исследования

Прежде всего рассмотрим результаты экспериментальных исследований взрывов локальных облаков в большом помещении. Исследование дефла-

рационного взрывного горения локальных облаков проводилось на установке Института комплексной безопасности в строительстве (ИКБС), являющегося структурным подразделением Московского государственного строительного университета (МГСУ).

Основная суть методики создания локального взрывоопасного облака заключается в следующем. В кубе, который не имеет дна, но оборудован съемной крышкой, легко сдвигаемой в боковую сторону, мерным шприцем создается взрывоопасная смесь, имеющая заданную концентрацию. Куб, у которого предварительно сдвигается вбок верхняя крышка, быстро поднимается вверх. Это позволяет создать локальное взрывоопасное облако с заданными параметрами, так как обеспечивает минимальное движение подготовленной газовой смеси, находящейся внутри куба. После того как сформировано локальное взрывоопасное облако, осуществляется его воспламенение электрической искрой, находящейся в произвольном месте облака.

В ходе эксперимента проводилась регистрация взрывного давления и скоростная видеосъемка процесса взрыва. Видеозапись взрыва проводилась на скорости от 200 до 500 кадров в секунду. Это позволило получить достаточно подробные данные о кинематике фронта пламени, выполняющего роль проникаемого поршня,двигающего окружающий смесь воздух и создающего взрывное давление.

По имеющимся фотографиям, полученным в ходе высокоскоростной киносъемки (240 кадров в секунду), была получена кинематика видимой скорости пламени, на основании которой был выполнен расчет взрывного давления. Расчет был выполнен в соответствии с методикой, изложенной в [1, 6, 15], в основу которой положена математическая модель расширяющегося монополя (см., например, [14]).

Результаты расчета достаточно хорошо совпадают с экспериментальными данными [3, 7]. Следует подчеркнуть, что при расчетах нестационарных газодинамических процессов качество согласия или, проще говоря, совпадения между расчетом и экспериментом значительно отличается от качества результатов сравнения расчетов и экспериментов, принятых в стационарных приложениях механики сплошной среды [16–18].

Основной особенностью локальных взрывов в помещениях является возможность появления эффекта «эхо». Критерием возникновения звуковых колебаний при локальных взрывах в помещениях является соотношение между максимальным размером помещения L и общим временем реализации взрыва T . Локальный взрыв длительностью T создает взрывную волну с длиной, равной TC , где C — скорость звука. При условии, если $L > TC/2$, т.е. если взрывная волна «умещается» в помещении, то возни-

кает эффект «эхо». В противном случае происходит экспоненциальное затухание акустической волны. Эффект затухания акустической волны с длиной, которая превышает размер помещения, в акустике имеет специальное название — «отсечка» [1, 14].

Результаты экспериментальных исследований и сравнение их с расчетными данными позволяют восстанавливать сценарии развития взрывных аварий. В том числе и применительно к аварийным взрывам локальных взрывоопасных облаков в больших помещениях (складах, холодильных камерах, гаражах и т.д.), в которых взрывные явления, связанные с горением взрывоопасных локальных облаков, являются достаточно распространенным явлением [19–21]. Для решения указанных задач наиболее целесообразно привлекать разностные методы расчета, основанные на численном интегрировании законов сохранения в сплошной среде [1, 5, 15]. Наиболее целесообразно использовать метод Годунова, который применим к расчетам задач, содержащих разрывы в начальных и граничных условиях [1, 15]. Общая схема расчетов достаточно подробно изложена в источниках [1, 15].

Ниже приведены некоторые результаты расчетов, позволяющих восстановить сценарий развития взрывной аварии.

На рис. 1 приведены схема и фотография обрушения перекрытий складского здания, в результате которого погибло 8 человек.

Проведенные расчеты газодинамических потоков, сопровождавших аварийный «хлопок», который

вызвал обрушение ферм перекрытия, позволили восстановить сценарий развития аварии. Следует отметить, что при подобных задачах проводится серия расчетов, из которых выбираются расчеты, результаты которых наиболее полно соответствуют имевшим место разрушениям и показаниям свидетелей аварии. Результатом чего и является искомый сценарий развития взрывной аварии.

На рис. 2 приведена исходная расчетная область, а на рис. 3 показаны изолинии максимального взрывного давления, создаваемого «хлопком», приведшем к обрушению кровли склада. При проведении расчетов использовались материалы, изложенные в [1, 5, 7, 15].

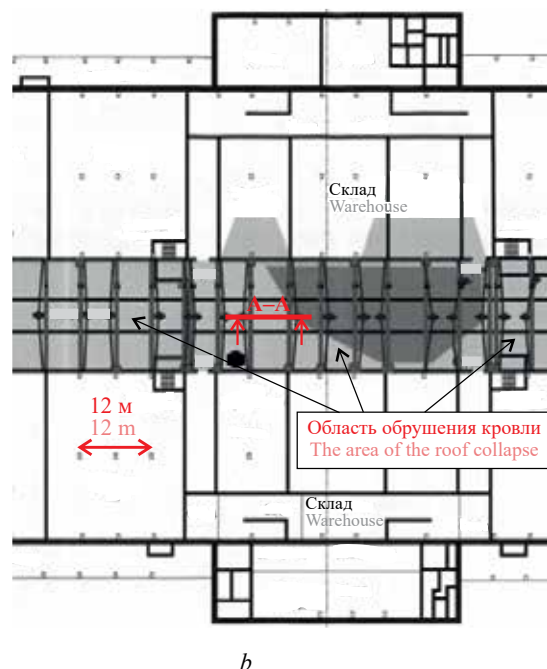
В качестве расчетной области был принят фрагмент помещения разгрузочной склада между 15 и 18 фермами. Расчетная область, представляющая собой схематизацию фрагмента продольного сечения склада, приведена на рис. 2.

При расчетах принято, что в процессе аварии произошло накопление взрывоопасной смеси вблизи кровли здания. Зона скопления взрывоопасной смеси указана на рис. 2.

Исходным веществом для ее формирования могут служить как продукты разложения, возникающие в результате пожара, так и разного рода горючие вещества, которые могли находиться в прилегающих к месту возгорания складских помещениях. При расчетах параметров дефлаграционного взрыва было принято, что в газопаровоздушной смеси, прилегающей к кровле, находится 14 кг газа (пара)



a



b

Рис. 1. Обрушение кровли склада при аварийном «хлопке», происшедшем при ликвидации пожара: *a* — фотография зоны обрушения кровли; *b* — план здания с указанием области обрушения кровли

Fig. 1. The collapse of the roof of the warehouse during an emergency “popping” that occurred during the liquidation of the fire: *a* — photo of the roof collapse zone; *b* — building plan indicating the area of roof collapse

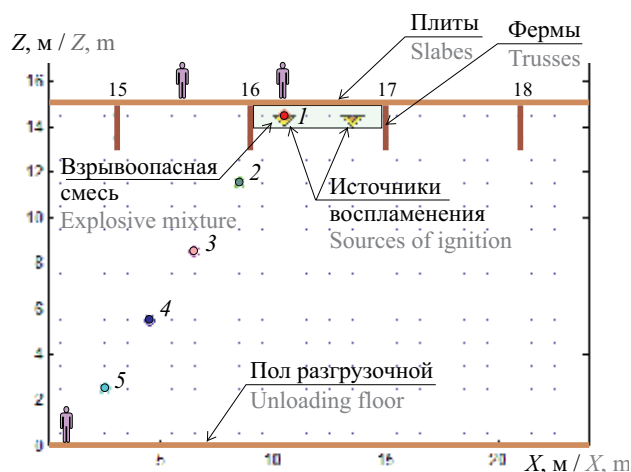


Рис. 2. Расчетная область с указанием начальных условий
Fig. 2. Calculated area with indication of initial conditions

взрывоопасного вещества. Данное количество паров соответствует 15–25 литрам легко воспламеняющейся жидкости (ЛВЖ). Например, для ацетона это соответствует 17,7 литрам, а для сжиженного пропана — 27,5 литрам. Указанные объемы ЛВЖ или газообразных взрывоопасных веществ с высокой вероятностью имеются на любом крупном складе.

Для лучшего понимания масштаба задачи на рис. 2 (в масштабе) приведены фигуры людей. При проведении расчетов принято, что смесь воспламеняется в двух местах, которые указаны на рис. 2. При аварийных ситуациях, связанных с пожарами, часто реализуется многоточечное воспламенение смеси. На рис. 2 указано 5 точек, для которых ниже будут приведены временные зависимости скорости потока и взрывного давления. Источником воспламенения могли быть раскаленные или горящие фрагменты предметов, поднимающиеся конвективными потоками, создаваемыми пожаром, или тлеющий рубероид кровли.

Изолинии равного максимального давления взрыва приведены на рис. 3. Численные значения изолиний приведены в кПа. Напомним, что давление в 10 кПа соответствует примерно давлению одной тонны веса на квадратный метр площади [1, 5, 7].

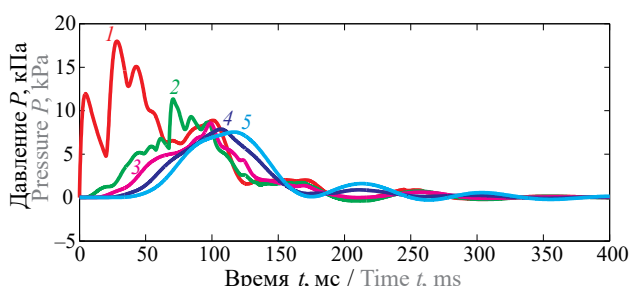


Рис. 4. Временные зависимости взрывного давления в пяти точках пространства
Fig. 4. Time dependences of explosive pressure at five points in space

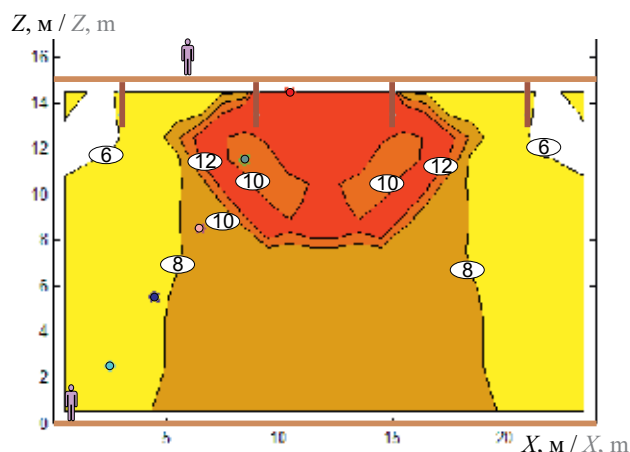


Рис. 3. Изолинии максимального взрывного давления
Fig. 3. Isolines of maximum explosive pressure

На рис. 4 приведены временные зависимости взрывного давления в пяти точках рассматриваемого пространства (положение точек указано на рис. 2).

На рис. 5 даны временные зависимости горизонтальной составляющей скорости потока, сопровождающего дефлаграционный взрыв, в пяти точках рассматриваемого пространства (положение точек указано на рис. 2).

Из приведенного рисунка следует, что на кровлю и ближайшие к месту взрыва фермы действует кратковременная взрывная нагрузка, превышающая 12 кПа (или более 1200 кг/м²). Данная нагрузка разрушила узлы крепления ферм, что привело к их падению и развороту верхних частей ферм.

Кроме этого, взрывная нагрузка сдвинула плиты покрытия. Все перечисленные смещения строительных конструкций привели к обрушению кровли и ферм на данном участке.

Аналогичным образом произошли обрушения других участков кровли и ферм.

Здесь следует отметить, что плавное и достаточно продолжительное во времени действие взрывного давления в точке 5, находящейся вблизи пола или на некотором удалении от места взрыва (см. рис. 4), не фиксируется человеческим ухом, воспринимающим

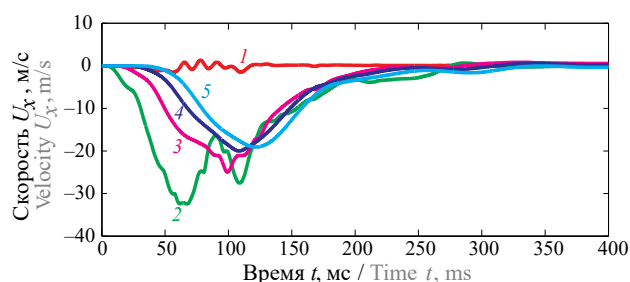


Рис. 5. Временные зависимости горизонтальной составляющей скорости потока в пяти точках пространства
Fig. 5. Time dependences of the horizontal component of the flow velocity at five points in space

динамическое давление только в диапазоне частот выше 10–15 Гц. При длительности взрывного воздействия 100–150 мс основная вибрационная энергия приходится на инфразвуковые частоты, которые человек не слышит, а воспринимает в виде сотрясения почвы или низкочастотного шипа. На данное явление, характерное для аварийных ситуаций в больших помещениях, указывалось ранее.

Приведенные расчеты позволили восстановить сценарий развития взрывной аварии.

Выводы

Описаны основные особенности и трудности, возникающие при математическом моделировании

(прогнозировании) и физическом моделировании (экспериментальных исследованиях) взрывных нагрузок, формирующихся при аварийных взрывах.

Показано, что для правильного прогнозирования нагрузок, которые реализуются при аварийных взрывах, необходимо четко и корректно моделировать физические процессы и рассматривать сценарии развития аварийной ситуации, которые наиболее адекватно соответствуют рассматриваемому объекту и окружающей застройке.

Приведены результаты расчета параметров взрывного давления, сопровождавшего реальную аварийную ситуацию. Приведен пример восстановления сценария развития взрывной аварии.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Комаров А.А. Прогнозирование нагрузок от аварийных дефлаграционных взрывов и оценка последствий их воздействия на здания и сооружения : дис. ... д-ра техн. наук. М. : МГСУ, 2001. 460 с.
2. Макеев В.И. Пожарная безопасность зданий, сооружений и объектов // Пожаровзрывобезопасность/Fire and Explosion Safety. 1992. № 3. С. 34–45.
3. Komarov A., Korolchenko D., Gromov N., Korolchenko A., Jafari M., Gravit M. Specific Aspects of Modeling Gas Mixture Explosions in the Atmosphere // Fire. 2023. Vol. 6 (5). P. 201. DOI: 10.3390/fire6050201
4. Комаров А.А. Особенности ударных и взрывных воздействий на строительные объекты // Безопасность труда в промышленности. 2021. № 9. С. 81–88. DOI: 10.24000/0409-2961-2021-9-81-88
5. Комаров А.А., Бажина Е.В. Воздействие газодинамических потоков, сопровождающих аварийные взрывы, на здания и сооружения // Природообустройство. 2022. № 1. С. 84–92. DOI: 10.26897/1997-6011-2022-1-84-92
6. Комаров А.А. Расчет газодинамических характеристик потоков при аварийных дефлаграционных взрывах на наружных установках // Пожаровзрывобезопасность/Fire and Explosion Safety. 2002. Т. 11. № 5. С. 15–18.
7. Комаров А.А. Основы обеспечения взрывобезопасности объектов и прилегающих к ним территорий. М. : Академия ГПС МЧС России, 2015. 90 с.
8. Комаров А.А., Тимохин В.В. Экспериментальное исследование и моделирование процесса формирования взрывоопасных концентраций // Безопасность труда в промышленности. 2023. № 1. С. 84–88. DOI: 10.24000/0409-2961-2023-1-84-88
9. Комаров А.А., Бажина Е.В. Методы расчета дрейфа тяжелых облаков с учетом движения среды // Безопасность труда в промышленности. 2022. № 7. С. 7–14. DOI: 10.24000/0409-2961-2022-7-7-14
10. Ландау Л.Д., Лифшиц Е.М. Гидродинамика. Теоретическая физика. Т. VI. М. : Наука. Гл. ред. физ-мат. лит., 1986. 736 с.
11. 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
12. Kashevarova G., Pepelyaev A. Numerical simulation of domestic gas deflagration explosion and verification of computational techniques // Advanced materials research. 2013. Vol. 742. Pp. 3–7. DOI: 10.4028/www.scientific.net/AMR.742.3
13. Koshiba Y., Hasegawa T., Kim B., Ohtani H. Flammability limits, explosion pressures, and applicability of le Chatelier's rule to binary alkane-nitrous oxide mixtures // Journal of loss prevention in the process industries. 2017. Vol. 45. Pp. 11–19. DOI: 10.1016/j.jlp.2016.11.007
14. Авиационная акустика / под ред. А.Г. Мунина. М. : Машиностроение, 1973. 448 с.
15. Годунов С.К., Забродин А.В., Иванов М.Я., Крайко А.Н., Прокопов Г.П. Численное решение многомерных задач газовой динамики. М. : Наука, 1976. 400 с.
16. Xu Ying, Yimiao Huang, Guowei Ma. A review on effects of different factors on gas explosions in underground structures. Underground space, July. Elsevier BV. 2019. DOI: 10.1016/j.undsp.2019.05.002
17. Cen Kang, Song Bin, Shen Ruiqing, Zhang Yidong, Yu Wuge, Wang Qingsheng. Dynamic Characteristics of Gas Explosion and Its Mitigation Measures inside Residential Buildings // Mathematical Problems in Engineering. 2019. No. 5. Pp. 1–15. DOI: 10.1155/2019/2068958.

18. Remennikov A.M., Rose T.A. Modelling blast loads on buildings in complex city geometries // *Computers & Structures*. 2005. Vol. 83. No. 27. Pp. 2197–2205. DOI: 10.1016/j.compstruc.2005.04.003
19. Bao Q., Fang Q., Zhang Y., Chen L., Yang S., Li Z. Effects of gas concentration and venting pressure on overpressure transients during vented explosion of methane-air mixtures // *Fuel*. 2016. Vol. 175. Pp. 40–48. DOI: 10.1016/j.fuel.2016.01.084
20. Fakandu B.M. Vented gas explosions. University of Leeds. 2014. 358 p.
21. Wei Sh., Deng H., Dong J., Xu Zh., Yan M., Chen G. The experimental study on deflagration dynamics of premixed flame in T-type tube // *Energy Sources, Part A: Recovery, Utilization, and Environmental Effects*. 2022. Vol. 44. Issue 3. Pp. 7347–7364. DOI: 10.1080/15567036.2022.2109777

REFERENCES

1. Komarov A.A. *Forecasting loads and estimating consequences of their impact on buildings and structures : Doctoral Thesis*. Moscow, MSCU, 2001; 460. (rus).
2. Makeev V.I. Fire safety of buildings, installations and facilities. *Pozharovzryvobezopasnost' / Fire and Explosion Safety*. 1992; 3:34-45. (rus).
3. Komarov A., Korolchenko D., Gromov N., Korolchenko A., Jafari M., Gravit M. Specific aspects of modeling gas mixture explosions in the atmosphere. *Fire*. 2023; 6(5):201. DOI: 10.3390/fire6050201
4. Komarov A.A. The specific characteristics of shock and blast impacts on construction sites. *Occupational Safety in Industry*. 2021; 9:81-88. DOI: 10.24000/0409-2961-2021-9-81-88 (rus).
5. Komarov A.A., Bazhina E.V. Impact of gas-dynamic flows accompanying emergency explosions on buildings and structures. *Environmental Engineering*. 2022; (1):84-92. DOI: 10.26897/1997-6011-2022-1-84-92 (rus).
6. Komarov A.A. Calculation of gas-dynamic characteristics of flows at deflagration explosions at outdoor installations. *Pozharovzryvobezopasnost' / Fire and Explosion Safety*. 2002; 11(5):15-18. (rus).
7. Komarov A.A. *Fundamentals of ensuring explosion safety of objects and adjacent territories*. Moscow, AGPS. 2015; 90. (rus).
8. Komarov A.A., Timokhin V.V. Experimental investigation and modeling of the formation of explosive concentrations. *Occupational Safety in Industry*. 2023; 1:84-88. DOI: 10.24000/0409-2961-2023-1-84-88 (rus).
9. Komarov A.A., Bazhina E.V. Methods for calculating the drift of heavy clouds considering medium motion. *Occupational Safety in Industry*. 2022; 7:7-14. DOI: 10.24000/0409-2961-2022-7-7-14 (rus).
10. Landau L.D., Lifshits E.M. *Hydrodynamics. Theoretical physics*. T. VI. Moscow, Science. Gl. ed. phys.-mat. Lit, 1986; 736. (rus).
11. Polandov Yu.K., Korolchenko D.A., Evich A.A. Conditions of occurrence of fire in the room with a gas explosion. Experimental data. *Pozharovzryvobezopasnost' / Fire and Explosion Safety*. 2020; 29(1):9-21. DOI: 10.18322/PVB.2020.29.01.9-21 (rus).
12. Kashevarova G., Pepelyaev A. Numerical simulation of domestic gas deflagration explosion and verification of computational techniques. *Advanced materials research*. 2013; 742:3-7. DOI: 10.4028/www.scientific.net/AMR.742.3
13. Koshiba Y., Hasegawa T., Kim B., Ohtani H. Flammability limits, explosion pressures, and applicability of le Chatelier's rule to binary alkane- nitrous oxide mixtures. *Journal of loss prevention in the process industries*. 2017; 45:11-19. DOI: 10.1016/j.jlp.2016.11.007
14. *Aviation Acoustics*. Edited by Munin A.G. Moscow, Mashinostroenie, 1973; 448. (rus).
15. Godunov S.K., Zabrodin A.V., Ivanov M.Ya., Krayko A.N., Prokopov G.P. *Numerical solution of multidimensional problems of gas dynamics*. Moscow, Nauka Publ., 1976; 400. (rus).
16. Xu Ying, Yimiao Huang, Guowei Ma. A review on effects of different factors on gas explosions in underground structures. *Underground Space. July. Elsevier BV*. 2019. DOI: 10.1016/j.undsp.2019.05.002
17. Cen K., Bin Song, Ruiqing Shen, Yidong Zhang, Wuge Yu, Qingsheng Wang. Dynamic characteristics of gas explosion and its mitigation measures inside residential buildings. *Mathematical Problems in Engineering. Hindawi Limited*. 2019; 5:1-15. DOI: 10.1155/2019/2068958
18. Remennikov A.M., Rose T.A. Modelling blast loads on buildings in complex city geometries. *Computers & Structures*. 2005; 83(27):2197-2205. DOI: 10.1016/j.compstruc.2005.04.003
19. Bao Q., Fang Q., Zhang Y., Chen L., Yang S., Li Z. Effects of gas concentration and venting pressure on overpressure transients during vented explosion of methane-air mixtures. *Fuel*. 2016; 175:40-48. DOI: 10.1016/j.fuel.2016.01.084
20. Fakandu B.M. Vented gas explosions. *University of Leeds*. 2014; 358.
21. Wei Sh., Deng H., Dong J., Xu Zh., Yan M., Chen G. The experimental study on deflagration dynamics of premixed flame in T-type tube. *Energy Sources, Part A: Recovery, Utilization, and Environmental Effects*. 2022; 44(3):7347-7364. DOI: 10.1080/15567036.2022.2109777

Поступила 25.10.2023, после доработки 22.11.2023;
принята к публикации 04.12.2023

Received October 25, 2023; Received in revised form November 22, 2023;
Accepted December 4, 2023

Информация об авторе

КОМАРОВ Александр Андреевич, д-р техн. наук, профессор кафедры комплексной безопасности в строительстве, руководитель НИЦ «Взрывобезопасность» ИКБС, Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет, Россия, 129337, г. Москва, Ярославское шоссе, 26; РИНЦ ID: 155673; Scopus AuthorID: 57192380312; ResearcherID: AAC-8725-2022; ORCID: 0000-0003-2764-639X; e-mail: KomarovAA@mgsu.ru

Information about the author

Alexander A. KOMAROV, Dr. Sci. (Eng.), Professor of Department of Integrated Safety in Civil Engineering, Head of the Explosion Safety Research Center of Institute of Complex Safety in Construction, Moscow State University of Civil Engineering (National Research University), Yaroslavskoe Shosse, 26, Moscow, 129337, Russian Federation; ID RISC: 155673; Scopus AuthorID: 57192380312; ResearcherID: AAC-8725-2022; ORCID: 0000-0003-2764-639X; e-mail: KomarovAA@mgsu.ru

Идентификация термопластичных полимеров методом синхронного термического анализа

Оксана Владимировна Беззапонная ✉, Сергей Викторович Макаркин, Павел Александрович Глухих

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

АННОТАЦИЯ

Введение. Представлены результаты исследования термопластичных полимерных материалов различной химической природы (полиэтилен высокой плотности, поликарбонат, поливинилхлорид), способных при воздействии высоких температур пожара плавиться, растекаться, гореть и капать, формируя вторичные очаги пожара. Обоснована актуальность применения высокоточного и информативного метода синхронного термического анализа для определения химической природы полимеров вещной обстановки пожара.

Цели и задачи. Целью исследования являлась оценка возможности применения метода синхронного термического анализа для идентификации полимерных материалов с разной степенью термического воздействия на них при диагностике формирования вторичных очагов пожара в рамках пожарно-технической экспертизы. Для достижения цели решены следующие задачи: определены термоаналитические характеристики для идентификации полукристаллических термопластов в нативном состоянии, подверженных высокотемпературному воздействию пожара; определены термоаналитические характеристики для идентификации аморфных полимерных материалов с разной степенью термического воздействия на них.

Методы. При исследовании применялся метод синхронного термического анализа, включающий в себя: термогравиметрический анализ, дифференциальную термогравиметрию и дифференциальную сканирующую калориметрию. Приведен пример совмещения метода синхронного термического анализа с методом квадрупольной масс-спектрометрии для решения задачи идентификации термопластов.

Результаты. Изучены закономерности термической и термоокислительной деструкции полимерных материалов. Рассмотрена методология идентификации термопластов методом синхронного термического анализа. Установлено, что для полимеров с температурой воздействия до 300 °С значимую информацию о химической природе полимера дают значения температур фазовых переходов (плавления, стеклования, термо- (термоокислительной) деструкции). Определение химической природы термопластов с высокой степенью выгорания возможно только при наличии экстремумов на кривых дифференциальной термогравиметрии и дифференциальной сканирующей калориметрии в высокотемпературном интервале термоллиза полимеров. Показана возможность идентификации термопластов при совмещении термического анализа с масс-спектрометрией.

Выводы. Анализ результатов исследований показал, что значимыми термоаналитическими характеристиками для идентификации полукристаллических термопластов являются температура плавления и температура максимальной скорости потери массы процесса термо- или термоокислительной деструкции полимера. Для аморфных термопластов — температура стеклования и температура термо- или термоокислительной деструкции полимера.

Ключевые слова: вторичные очаги пожара; температура плавления; температура стеклования; температура термоокислительной деструкции полимера; пожарно-техническая экспертиза

Для цитирования: Беззапонная О.В., Макаркин С.В., Глухих П.А. Идентификация термопластичных полимеров методом синхронного термического анализа // Пожаровзрывобезопасность/Fire and Explosion Safety. 2024. Т. 33. № 1. С. 24–35. DOI: 10.22227/0869-7493.2024.33.01.24-35

✉ Беззапонная Оксана Владимировна, e-mail: bezzaponnay@mail.ru

Identification of thermoplastic polymers by method of synchronous thermal analysis

Oksana V. Bezzaponnaya ✉, Sergey V. Makarkin, Pavel A. Glukhikh

Ural Institute of the State Fire Service of the Ministry of the Russian Federation for Civil Defense, Emergencies and Elimination on Consequences of Natural Disasters, Ekaterinburg, Russian Federation

ABSTRACT

Introduction. The results of research of thermoplastic polymeric materials of different chemical nature (high-density polyethylene, polycarbonate, polyvinyl chloride), capable of melting, spreading, burning and dripping when exposed to high fire temperatures, forming secondary fire centers, are presented. The relevance of application of a highly accurate and informative method of synchronous thermal analysis to determine the chemical nature of polymers in fire conditions is substantiated.

Goals and objectives. The purpose of the research was to assess the possibility of application of the method of synchronous thermal analysis to identify polymeric materials with different degree of thermal impact on them when diagnosing the formation of secondary fires within the framework of fire-technical expertise.

To achieve the goal, the following tasks were solved: thermoanalytical characteristics to identify semi-crystalline thermoplastics in the native state and exposed to high-temperature effects of fire were determined; thermoanalytical characteristics to identify amorphous polymeric materials with different degrees of thermal impact on them were determined.

Methods. The method of synchronous thermal analysis, including: thermogravimetric analysis, differential thermogravimetry and differential scanning calorimetry was used in the study. An example of combining the method of synchronous thermal analysis with the method of quadrupole mass spectrometry to solve the problem of identification of thermoplastics is presented.

Results. The regularities of thermal and thermo-oxidative degradation of polymeric materials were studied. The methodology of identification thermoplastics by the method of synchronous thermal analysis is considered. It was established that for polymers with exposure temperatures up to 300 °C, significant information about the chemical nature of the polymer is provided by the values of phase transition temperatures (melting, glass transition, thermal (thermo-oxidative) degradation). Determination of the chemical nature of thermoplastics with a high degree of burn-up is possible only in the presence of extrema in the curves of differential thermogravimetry and differential scanning calorimetry in the high-temperature range of polymer thermolysis. The possibility of identification of thermoplastics by combining thermal analysis with mass spectrometry is demonstrated.

Conclusions. The analysis of research results has shown that the significant thermoanalytical characteristics for identification of semi-crystalline thermoplastics are the melting temperature and the temperature of the maximum mass loss rate of the process of thermal or thermo-oxidative degradation of the polymer. For amorphous thermoplastics — the glass transition temperature and the temperature of thermo-oxidative degradation of the polymer.

Keywords: secondary fires; melting point, glass transition temperature; temperature of thermo-oxidative degradation of polymer; fire-technical expertise

For citation: Bezzaponnaya O.V., Makarkin S.V., Glukhikh P.A. Identification of thermoplastic polymers by method of synchronous thermal analysis. *Pozharovzryvobezopasnost/Fire and Explosion Safety*. 2024; 33(1):24-35. DOI: 10.22227/0869-7493.2024.33.01.24-35 (rus).

✉ Oksana Vladimirovna Bezzaponnaya, e-mail: bezzaponnay@mail.ru

Введение

При производстве пожарно-технической экспертизы (ПТЭ) одной из основных задач, решаемых экспертами, является определение местонахождения очага пожара. При реконструкции пожара и путей его распространения необходимо рассматривать возможность формирования вторичных очагов пожара (ВОП), например, при плавлении и растекании (капании) горящих масс термопластичных полимерных материалов. Примером развития пожара по причине капания горящих масс термопластичного полимерного материала является пожар в ТРЦ «Зимняя вишня» в Кемерове.

При диагностике возможности формирования ВОП перед экспертом ставится вопрос о способности полимерного материала переходить в пластическое состояние, течь, гореть, капать. На первом этапе производства ПТЭ решается задача по определению химической природы полимера, которая усложняется тем, что термопластичные полимеры характеризуются разной степенью кристалличности и провести, например, идентификацию аморфных термопластов по температуре стеклования в некоторых случаях не представляется возможным. Помимо этого, при воз-

действии высоких температур пожара, в большинстве случаев, полимер практически весь выгорает, и задача по его идентификации еще более усложняется.

Для определения химической природы полимеров целесообразно применять современные инструментальные методы, в частности высокоточный (погрешность не превышает 3 %) и информативный метод синхронного термического анализа (СТА). Данный метод позволяет определять температуры плавления полукристаллических полимеров, температуры стеклования аморфных полимеров, тепловые эффекты фазовых переходов. По мнению авторов статьи [1], определить химическую природу полимера можно по значениям энергии активации процесса термоокислительной деструкции полимеров с использованием метода СТА, однако для подтверждения данной гипотезы необходимы дополнительные исследования, поскольку в большинстве случаев у образцов полимеров с мест пожара процесс термоокислительной деструкции уже практически завершен, а идентификационные признаки утрачены.

В настоящее время уже накоплен значительный материал по результатам экспериментальных исследований полимерных материалов методами

термического анализа, в том числе: для оценки термической стабильности полимеров [2–4]; по определению температур фазовых переходов [5, 6], анализа окислительно-деструктивных процессов [7–9]; оценки пожароопасных свойств полимеров [10, 11], исследованию кинетики термо- и термоокислительной деструкции полимеров [12–14], идентификации полимеров и композитов на их основе [15, 16], а также для решения задач пожарно-технической экспертизы [17, 18], в частности идентификационных задач [19, 20].

Идентификацию термопластов обычно проводят по значениям температур плавления полимеров, однако данная характеристика не может быть единственной ввиду разной степени кристалличности и аморфной природы полимеров, а также ввиду невозможности ее определения для образцов полимеров с высокой степенью выгорания. В связи с этим актуальны исследования по определению значимых термоаналитических характеристик, которые можно использовать для определения химической природы термопластичных полимеров различной химической природы и с разной степенью термического воздействия на них.

В связи с вышесказанным, целью исследований являлась оценка возможности применения метода СТА для идентификации полимерных материалов с разной степенью термического воздействия на них при диагностике формирования вторичных очагов пожара. Для достижения цели ставились задачи по определению термоаналитических характеристик полукристаллических и аморфных термопластов в нативном состоянии, подверженных высокотемпературному воздействию с использованием метода СТА, по которым можно определить химическую природу полимеров с мест пожаров.

Материалы и методы исследования

В качестве объектов исследования были выбраны самые распространенные полимеры как в быту, так и используемые при производстве строительных и отделочных материалов: полиэтилен (ПЭ) высокой плотности, поликарбонат (ПК) и поливинилхлорид (ПВХ).

Исследования полимеров различной химической природы проводились методом СТА на приборе Netzsch STA 449 F5 Jupiter в инертной среде азота, а также в среде воздуха с расходом газа 75 мл/мин, в корундовых тиглях, в динамических условиях со скоростью нагрева 20 °С/мин. Масса навесок исследуемых полимеров составляла 5–6 мг. Конечная температура исследований составляла 900 °С.

Перед проведением термического анализа образцов полимерных материалов проводилось их кондиционирование в течение трех суток. Для термического анализа термопластов с высокой степенью

выгорания образцы полимеров предварительно подвергались высокотемпературному воздействию до 600 °С при скорости нагрева 20 °С/мин с дальнейшим их кондиционированием.

Для определения термоаналитических характеристик исследуемых термопластов термограммы обрабатывались с использованием программного обеспечения Proteus 6.1.

Для получения дополнительных сведений при определении химической природы полимеров применялся метод квадрупольной масс-спектрометрии при совмещении его с методом СТА. Исследования проводились на квадрупольном масс-спектрометре Netzsch QMS 403 D Aeolos®.

Результаты исследования и их обсуждение

Определение значимых термоаналитических характеристик термической и термоокислительной деструкции термопластичных полимеров проводилось на основе анализа кривых термогравиметрии (ТГ), дифференциальной термогравиметрии (ДТГ) и дифференциальной сканирующей калориметрии (ДСК) полученных термограмм. Термоаналитическая характеристика является значимой только в том случае, если по ней можно установить идентичность исследуемого материала. В качестве значимых идентификационных характеристик в термическом анализе может выступать потеря массы веществом при заданной температуре, температуры максимумов ДТГ или ДСК пиков, зольный или коксовый остаток и т.д. Для определения значимых идентификационных характеристик необходимо изучение закономерностей термолитиза исследуемых материалов.

Термограмма ПЭ высокой плотности в инертной среде азота представлена на рис. 1.

Анализ ТГ и ДТГ кривых ПЭ свидетельствует о значительной потере массы в интервале 400–580 °С. Термодеструкция ПЭ начинается при температуре 440,0 °С. Максимальная скорость потери массы составила 20,37 %/мин при температуре 463,1 °С.

На ДСК кривой в интервале температур 100–200 °С присутствует ярко выраженный эндотермический пик, свидетельствующий о плавлении полимера, что позволяет диагностировать его термопластичность и способность растекаться и капать с формированием ВОП. Температура плавления полимеров определяется по температуре максимума пика плавления и для исследуемого ПЭ составила 137,9 °С. По данной термоаналитической характеристике представляется возможным проводить идентификацию термопластичных полимеров с высокой степенью кристалличности, однако при этом необходимо учитывать, что наличие добавок наполнителей в составе полимера может привести

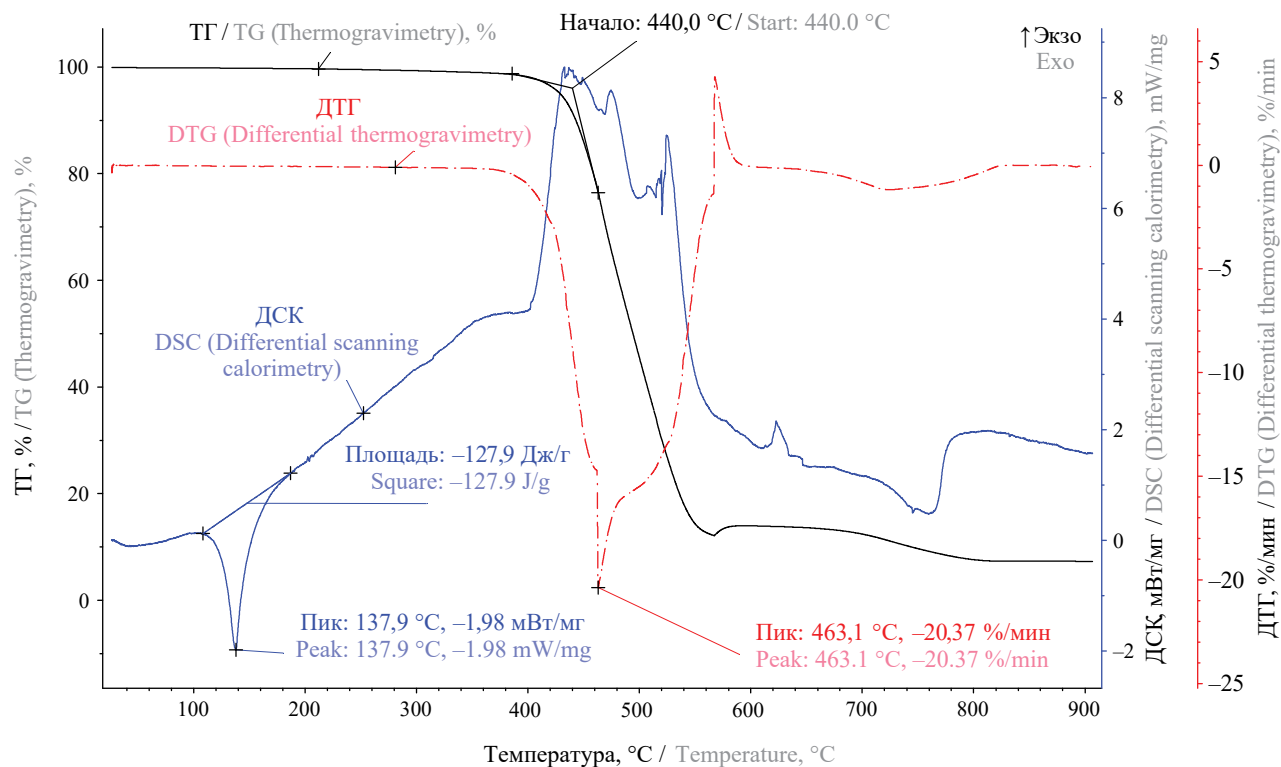


Рис. 1. Термограмма полиэтилена высокой плотности в атмосфере азота

Fig. 1. Thermogram of high-density polyethylene in a nitrogen atmosphere

к изменению температуры плавления на несколько градусов. Теплота плавления исследуемого ПЭ высокой плотности составила 127,9 Дж/г. Степень

кристалличности, рассчитанная известным методом с использованием теплоты плавления ПЭ со 100 % кристалличностью, составила 43,5 %.

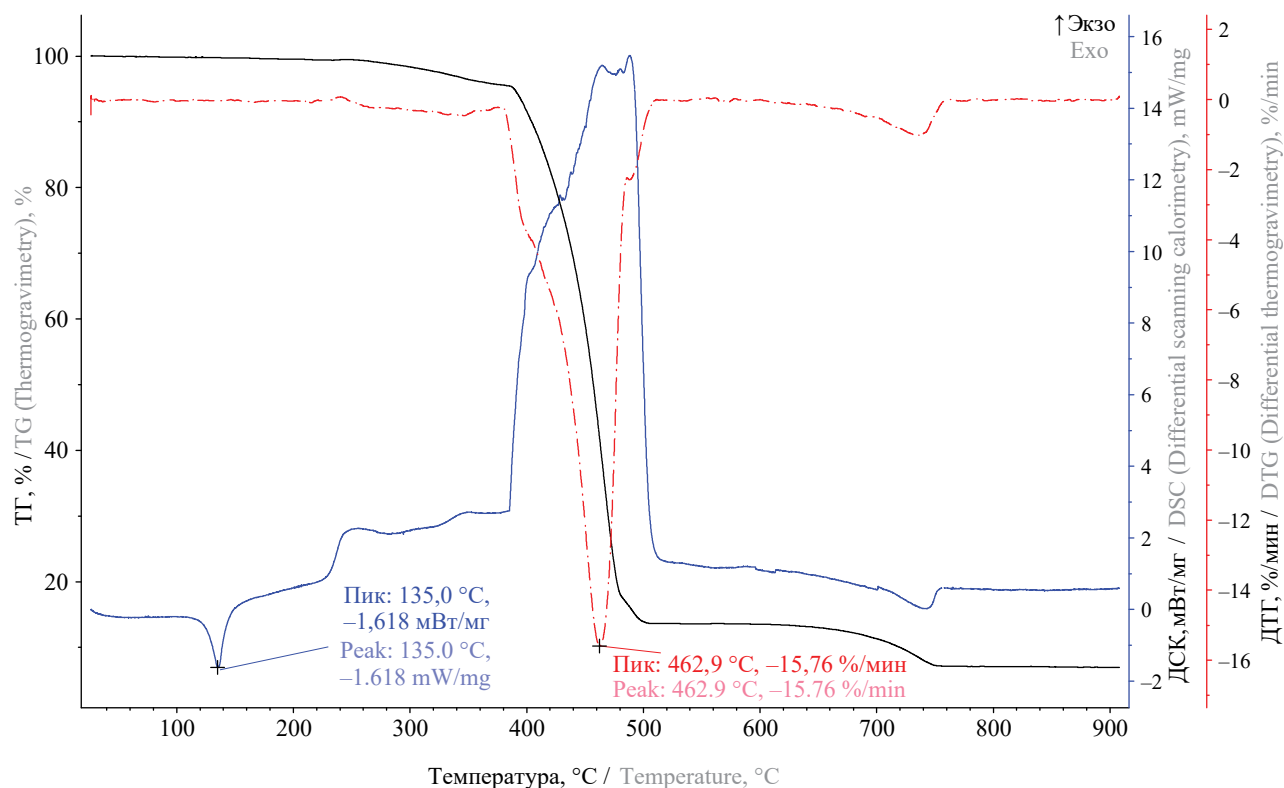


Рис. 2. Термограмма полиэтилена высокой плотности в атмосфере воздуха

Fig. 2. Thermogram of high-density polyethylene in air atmosphere

Исследование образцов ПЭ было также проведено и в окислительной среде воздуха для получения термоаналитических характеристик термоокислительной деструкции данного полимера (рис. 2).

Температура плавления ПЭ в среде воздуха составила 135,0 °С, чуть ниже значения температуры плавления, полученного в инертной среде. Максимальная скорость потери массы у ПЭ (температура термоокислительной деструкции) достигается при температуре 462,9 °С. Данная термоаналитическая характеристика значимо характеризует процесс термоокислительной деструкции ПЭ высокой плотности и вместе с температурой плавления может быть использована для его идентификации в нативном состоянии или незначительно подверженного тепловому воздействию (до температур 300–350 °С).

Наличие экзотермического пика в интервале температур 360–550 °С на кривой ДСК в окислительной среде воздуха свидетельствует о его способности к горению и распространению пламени.

Идентификационной характеристикой нативных образцов полимеров, или в незначительной степени (до 300–350 °С) подверженных термическому воздействию, по мнению авторов статьи, может выступать также энергия активации процесса их термоокислительной деструкции, которая рассчитывается по результатам ТГ анализа.

Определение химической природы полимеров, подверженных термическому воздействию в условиях пожара, значительно усложняется ввиду протекания процесса термоокислительной деструкции и стирания идентификационных признаков. Для решения этой задачи необходимы сведения о термолитизе полимеров после предварительного температурного воздействия на них. Термограмма ПЭ в среде воздуха после предварительного теплового воздействия в динамических условиях повышения температуры до 600 °С представлена на рис. 3.

Пик плавления на ДСК кривой отсутствует, и определить химическую природу полимера с использованием данной термоаналитической характеристики не представляется возможным. Ярко выраженные ДТГ и ДСК пики в интервале температур 700–800 °С, обусловленные, вероятнее всего, наполнением данного полимера карбонатом кальция (мелом), также не могут являться критериями для идентификации ПЭ. Значимой идентификационной характеристикой данного полимера может выступать экзотермический пик на ДСК кривой с максимумом при температуре 672,5 °С, характеризующий процесс завершения термоокислительной деструкции ПЭ. Таким образом, в случае воздействия на термопластичные полимерные материалы высоких температур пожара (до 600 °С) сохранившиеся ДСК и/или ДТГ пики

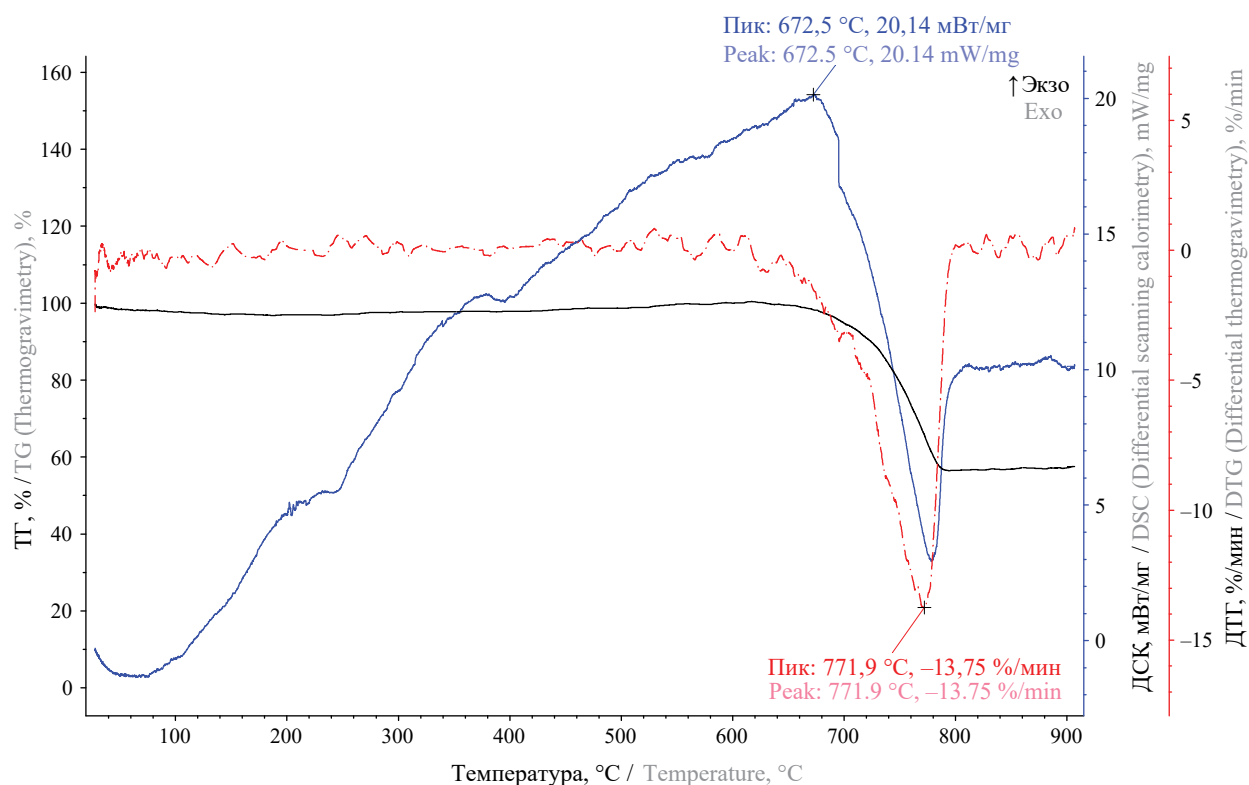


Рис. 3. Термограмма ПЭ в среде воздуха после предварительного температурного воздействия ($T = 600$ °С)

Fig. 3. Thermogram of PE in air after preliminary temperature exposure ($T = 600$ °С)

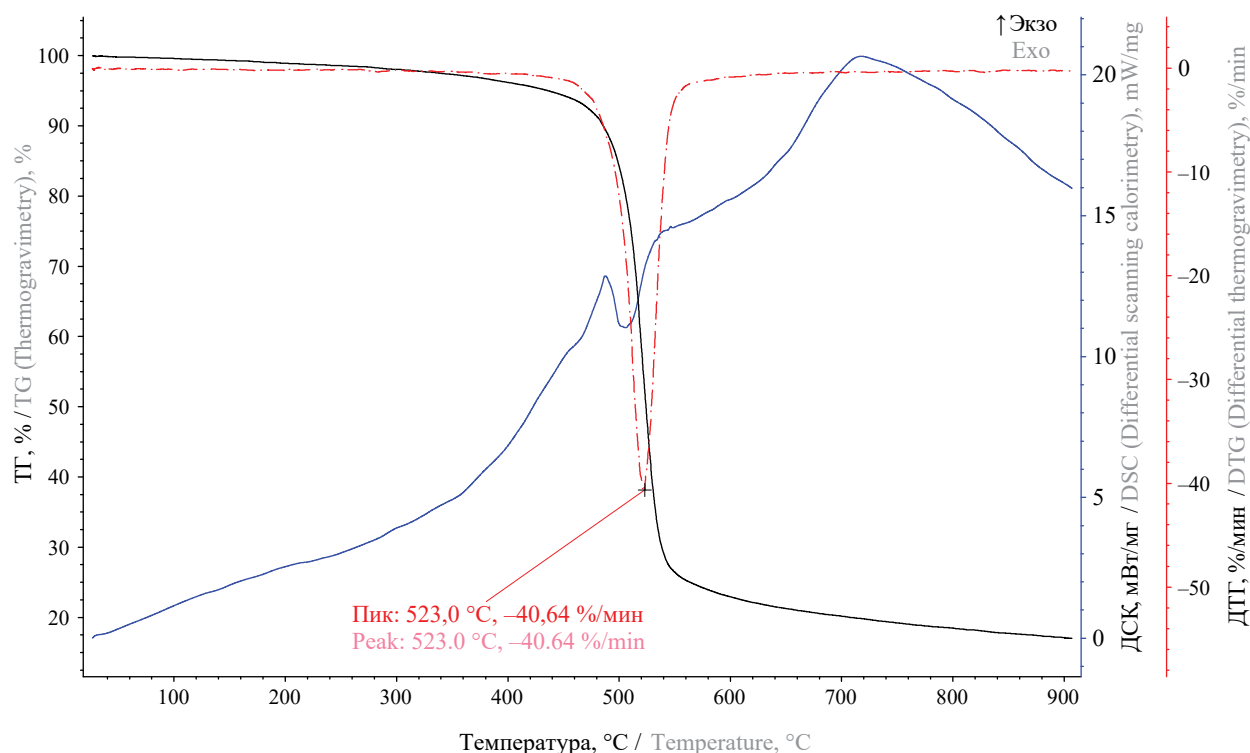


Рис. 4. Термограмма поликарбоната в среде азота

Fig. 4. Thermogram of polycarbonate in nitrogen environment

будут способствовать определению их химической природы. Необходимо только наличие в арсенале эксперта базы термограмм полимеров после высоко-температурного воздействия на них.

Рассмотрим термолит аморфного термопластичного полимера на примере ПК. Термограмма ПК в инертной среде азота представлена на рис. 4.

Термодеструкция ПК начинается при температуре 490,2 °C, а максимальная скорость потери массы (40,64 %) наблюдается при температуре 523 °C. Температура максимума ярко выраженного ДТГ пика (температура термодеструкции) может выступать в качестве значимой термоаналитической характеристики для идентификации данного полимера. Для детального изучения ДСК кривой использовали прием масштабирования (рис. 5).

После масштабирования кривой ДСК в интервале температур 142,1–142,7 °C наблюдается ступенька, характеризующая процесс стеклования полимера, что позволяет отнести его к термопластичным аморфным полимерам. Температура стеклования составила 142,4 °C и позволила квалифицировать полимер как ПК. То есть данный полимер при температурах выше 142,4 °C находится в текучем состоянии и при возгорании в температурных условиях пожара способен течь, капать, формируя ВОП.

Наличие ДТГ и ДСК пиков на термограмме ПК, полученной в окислительной среде воздуха (рис. 6) после предварительного теплового воздействия

до $T = 600$ °C на него, доказывает возможность идентификации данного полимера методом СТА.

Термограмма пленки из 100 % ПВХ представлена на рис. 7.

Отсутствие на ДСК кривой пика плавления и вместе с тем способность ПВХ переходить в вязкотекучее состояние при воздействии высоких температур свидетельствует о его аморфной природе. Аморфные полимеры диагностируют по температуре стеклования. Согласно справочной информации, температурный интервал стеклования ПВХ приходится на отрицательные значения температур, что указывает на невозможность проведения исследований процесса стеклования на применяемом

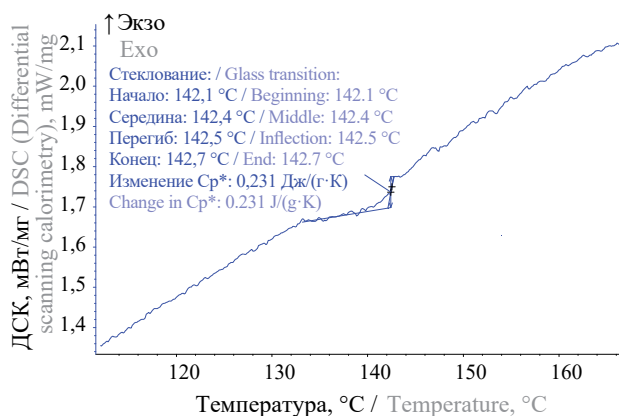


Рис. 5. Термограмма поликарбоната после масштабирования
Fig. 5. Thermogram of polycarbonate after scaling

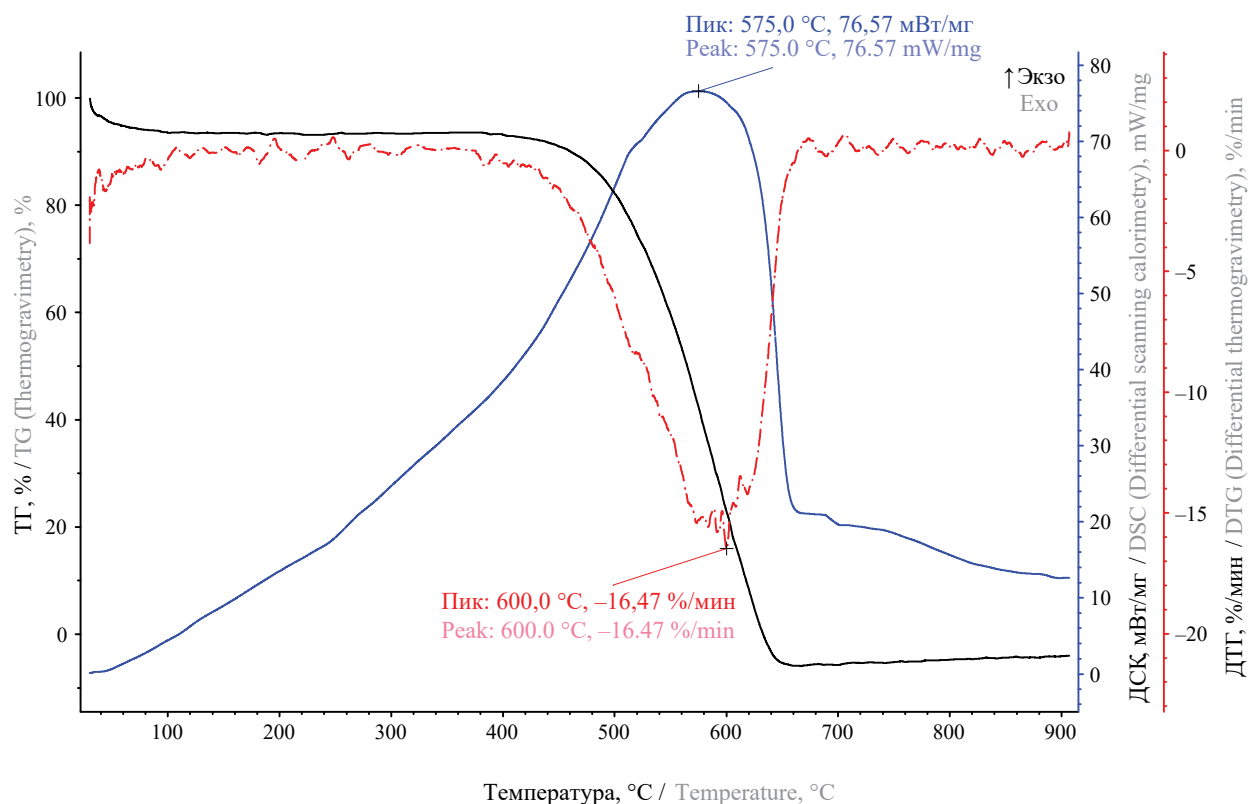


Рис. 6. Термограмма ПК в среде воздуха после предварительного температурного воздействия ($T = 600\text{ }^{\circ}\text{C}$)

Fig. 6. Thermogram of PC in air after preliminary temperature exposure ($T = 600\text{ }^{\circ}\text{C}$)

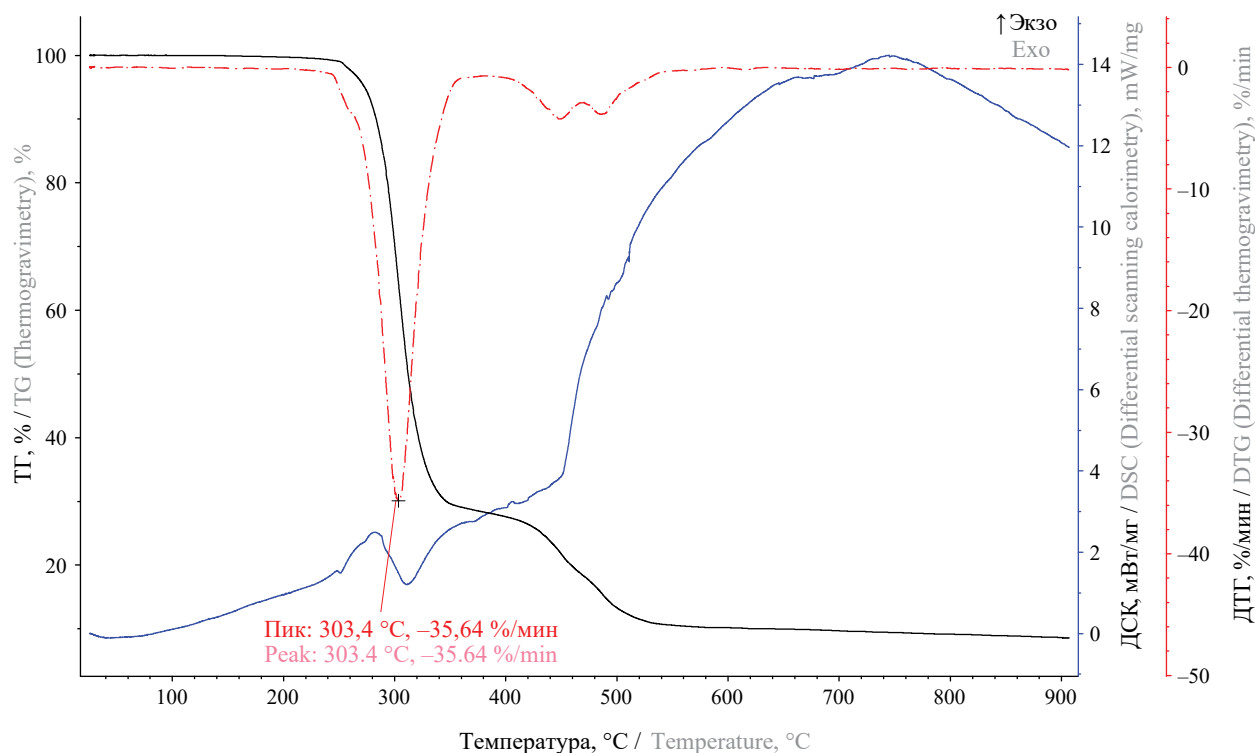


Рис. 7. Термограмма поливинилхлорида в среде азота

Fig. 7. Thermogram of polyvinyl chloride in nitrogen environment

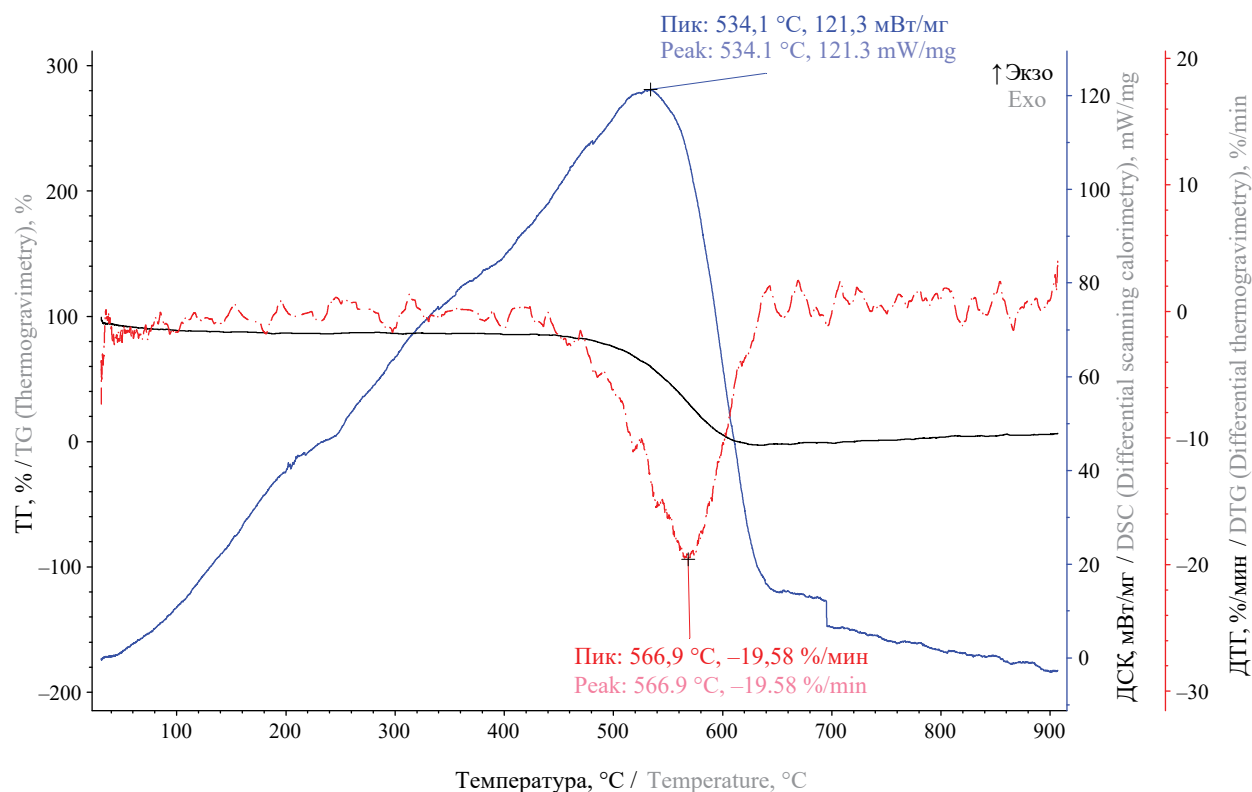


Рис. 8. Термограмма ПВХ в среде воздуха после предварительного температурного воздействия ($T = 600\text{ °C}$)

Fig. 8. Thermogram of PVC in air after preliminary temperature exposure ($T = 600\text{ °C}$)

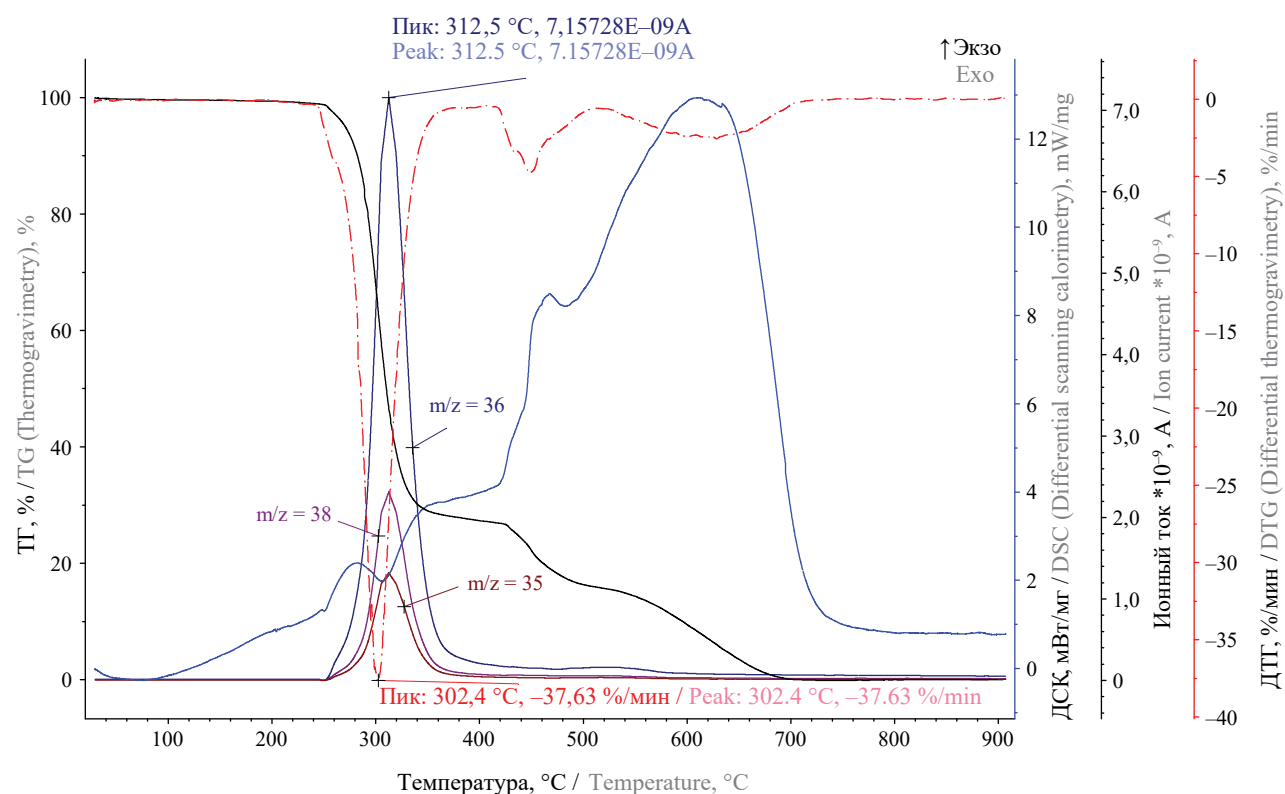


Рис. 9. Термограмма ПВХ с кривыми ионного тока с массовыми числами $m/z = 35$ а.е.м., $m/z = 36$ а.е.м. и $m/z = 38$ а.е.м.

Fig. 9. PVC thermogram with ion current curves with mass numbers $m/z = 35$ a.m.u., $m/z = 36$ a.m.u. and $m/z = 38$ a.m.u.

Термоаналитические характеристики термопластичных полимеров для определения их химической природы
Thermoanalytical characteristics of thermoplastic polymers to determine their chemical nature

Полимер Polymer	Идентификационные термоаналитические характеристики Identification thermoanalytical characteristics		
	$T_{пл}$ или $T_{ст}$ в среде азота / $T_{пл}$ или $T_{ст}$ в среде воздуха, °C/°C T_{mel} or T_g in inert environment / T_{mel} or T_g in the air, °C / °C	$T_{ТД} / T_{ТОД}$, °C / °C T_{TD} / T_{TOD} , °C / °C	$T_{ДТГmax} / T_{ДСКmax}$ после высокотемпературного воздействия, °C / °C T_{DTGmax} / T_{DSCmax} after high temperature exposure, °C / °C
ПЭ высокой плотности PE high density	137,9/135,0	463,1/462,4	-/672,5
ПК PC	142,4/143,0	523,0/518,6	600,0/575,6
ПВХ PVC	—	303,4/301,7	568,3/534,1

Примечание: $T_{пл}$ — температура плавления; $T_{ст}$ — температура стеклования; $T_{ТД}$ — температура термодеструкции; $T_{ТОД}$ — температура термоокислительной деструкции.

Note: T_{mel} — melting temperature; T_g — glass transition temperature; T_{TD} — thermal degradation temperature; T_{TOD} — thermo-oxidative degradation temperature.

термоанализаторе. В этом случае определить химическую природу полимера представляется возможным по температуре разложения (температуре максимума на ДТГ кривой) при проведении исследований в инертной среде или по температуре термоокислительной деструкции в среде воздуха. Температурный максимум наибольшей интенсивности потери массы наблюдается при температуре 303,4 °C и значимо характеризует ПВХ.

Наличие ДТГ и ДСК пиков на термограмме ПВХ, полученной в окислительной среде воздуха (рис. 8) после предварительного теплового воздействия при $T = 600$ °C на него, также доказывает возможность идентификации данного полимера.

Для получения дополнительных сведений при определении химической природы полимеров целесообразно применять метод масс-спектрометрии (квадрупольный масс-спектрометр Netzsch QMS 403 D Aëlos®) при совмещении его с методом СТА. В этом случае на термограмме дополнительно фиксируются кривые ионного тока при определенных значениях массовых чисел (m/z) (рис. 9).

На термограмме приведены кривые ионного тока с массовыми числами, свидетельствующими о выделении хлороводорода и хлора, что в сочетании с полными данными масс-спектрального анализа исследуемого полимера позволяет квалифицировать его как ПВХ.

Результаты испытаний по определению идентификационных термоаналитических характеристик термопластичных полимеров приведены в таблице.

Выводы

В результате исследований термопластичных полимерных материалов различной химической природы методом СТА определены значимые термоаналитические характеристики, позволяющие определить химическую природу полимера для дальнейшей диагностики возможности формирования ВОП:

- определение химической природы термопластичного полимера с высокой степенью кристалличности, не подверженного термическому воздействию в ходе пожара, целесообразно проводить по температуре плавления, определяемой по максимуму эндотермического пика в интервале температур 100–300 °C на ДСК кривой;
- определение химической природы нативных образцов аморфных термопластичных полимеров необходимо проводить по температуре стеклования, применяя в случае необходимости масштабирование ДСК сигнала;
- в качестве значимой термоаналитической характеристики для идентификации полимеров нативных образцов, а также образцов, в незначительной степени подверженных термическому воздействию (до температуры 300 °C), может выступать температура максимума ДТГ пика, характеризующая максимальную интенсивность термодеструкции (в инертной среде) или термоокислительной деструкции (в окислительной среде воздуха).

Показана возможность определения химической природы полимеров, подверженных высокотемпературному воздействию (до $T = 600$ °C), по максимумам ДТГ и ДСК пиков на термоаналитических кривых. При производстве пожарно-технической экспертизы идентификация таких термопластов возможна только при наличии у эксперта базы данных (термограмм) полимерных материалов после предварительного теплового воздействия на них.

Анализ полученных результатов свидетельствует о возможности применения метода СТА для определения химической природы термопластичных полимеров с мест пожара при диагностике формирования вторичных очагов пожара. Для получения большей информации для идентификации исследуемых полимеров целесообразно использовать совмещение метода СТА с методом масс-спектрометрии.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Бесчастных А.Н., Чешко И.Д., Андреева Е.Д. Экспертное исследование после пожара остатков пенополиуретанов // Пожаровзрывобезопасность/Fire and Explosion Safety. 2004. № 1. С. 80–86.
2. Zhiyi Jia, Xinyang Zhang, Xinyang Wang, Tao Zhao, Xinggang Chen, Minjie Wu et al. Structural design and synthesis of naphthalene-containing phthalonitrile polymer with excellent processability and high temperature properties // Journal of Polymer Science. 2023. Vol. 61. Issue 19. Pp. 2292–2302.
3. Abid M.K., Abbas I.M.M., Abid N.K., Jwad M.K. Investigate the thermal analysis properties of polymer electrolyte // Journal of Physics: Conference Series. 2021. Vol. 2114. P. 012048. DOI: 10.1088/1742-6596/2114/1/012048
4. Billah K.M.M., Lorenzana F.A.R., Martinez N.L., Chacon S., Wicker R.B., Espalin D. Thermal analysis of thermoplastic materials filled with chopped fiber for large area 3D printing // Solid Freeform Fabrication 2019: Proceedings of the 30th Annual International Solid Freeform Fabrication Symposium : An Additive Manufacturing Conference Texas. August. 2019. Pp. 892–898.
5. Thermal analysis of polymers: fundamentals and applications / J.D. Menczel, R.B. Prime (ed.). John Wiley & Sons, Publ. 2008. 688 p.
6. Ehrenstein G.W., Riedel G., Trawiel P. Thermal analysis of plastics : Theory and practice; Carl Hanser Verlag: Munich, Germany. 2004. 400 p. URL: <https://api.semanticscholar.org/CorpusID:138988997>
7. Беззапонная О.В. Исследование окислительно-деструктивных процессов, протекающих в огнезащитных составах интумесцентного типа с течением времени, методом термического анализа // Техносферная безопасность. 2018. № 3 (20). С. 66–71.
8. Hohenwarter D., Mattausch H., Fischer C., Berge M., Haar B. Analysis of the Fire Behavior of Polymers (PP, PA 6 and PE-LD) and their improvement using various flame retardants // Materials. 2020. Vol. 13. P. 5756. DOI: 10.3390/ma13245756
9. Беззапонная О.В., Лузина М.Д., Динисламов М.М. Применение метода синхронного термического анализа для оценки горючести веществ и материалов // Техносферная безопасность. 2022. № 4 (37). С. 127–140.
10. Мокряк А.Ю., Чешко И.Д., Елисеев Ю.Н., Принцева М.Ю. О роли горящих полимеров в возникновении и развитии пожара // Расследование пожаров : сб. ст. под общ. ред. И.Д. Чешко. СПб. : Санкт-Петербургский университет ГПС МЧС России, 2019. Вып. 6. С. 119–124.
11. Чешко И.Д., Принцева М.Ю., Лобанова О.В. Инструментальные методы в современной пожарно-технической экспертизе // Надзорная деятельность и судебная экспертиза в системе безопасности. 2020. № 4. С. 29–41.
12. Контелов А.А., Контелов И.А., Rogozina A.A., Юшков Е.С. Возможности методов термического анализа в применении к исследованию кинетики термического разложения полимеров // Журнал прикладной химии. 2016. Т. 89. Вып. 9. С. 1163–1169.
13. Charde S.J., Sonawane S.S., Sonawane S.H., Shimpic N.G. Degradation kinetics of polycarbonate composites // Chemical and Biochemical Engineering Quarterly. 2018. Vol. 32 (2). Pp. 151–165. DOI: 10.15255/CABEQ.2017.1173
14. Fateh T., Richard F., Rogaume T., Joseph P. Experimental and modelling studies on the kinetics and mechanisms of thermal degradation of polymethyl methacrylate in nitrogen and air // Journal of Analytical and Applied Pyrolysis. 2016. Vol. 120. Pp. 423–433. DOI: 10.1016/j.jaap.2016.06.014
15. Беззапонная О.В., Хабибова К.И. Применение метода термического анализа при идентификации термопластов и реактопластов в рамках пожарно-технической экспертизы // Техносферная безопасность. 2022. № (34). С. 85–91.
16. Беззапонная О.В., Головина Е.В., Акулов А.Ю. Идентификационный контроль огнезащитных составов интумесцентного типа методами термического анализа // Техносферная безопасность. 2019. № 1 (22). С. 52–57.
17. Беззапонная О.В. Оценка температуры воздействия на древесину в условиях пожара методами термического анализа // Техносферная безопасность. 2020. № 3 (28). С. 70–80.
18. Мокряк А.Ю., Елисеев Ю.Н., Чешко И.Д. О пожароопасных свойствах накладных светодиодных светильников // Расследование пожаров : сб. ст. / под общ. ред. И.Д. Чешко. СПб. : Санкт-Петербургский университет ГПС МЧС России, 2019. Вып. 6. С. 108–118.
19. Принцева М.Ю., Чешко И.Д. Применение термического анализа в экспертных исследованиях по делам о пожарах // Актуальные проблемы обеспечения пожарной безопасности и защиты от чрезвычайных ситуаций : сб. ст. по мат. Всеросс. науч.-практ. конф. Железногорск : ФГБОУ ВО Сибирская пожарно-спасательная академия, 2019. С. 260–270.
20. Принцева М.Ю., Лобова С.Ф. Применение термического анализа для расчета кинетических параметров термодеструкции полимеров при выполнении реконструкции пожара // Современные пожаробезопасные материалы и технологии : сб. мат. IV Междунар. науч.-практ. конф., посвящ. 30-й годовщине МЧС России. Иваново, 2020. С. 95–99. URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=44196459>

REFERENCES

1. Beschastnykh A.N., Cheshko I.D., Andreeva E.D. Expert study of polyurethane foam residues after a fire. *Pozharovzryvbezopasnost' / Fire and Explosion Safety*. 2004; 1:80-86. (rus).
2. Zhiyi Jia, Xinyang Zhang, Xinyang Wang, Tao Zhao, Xinggong Chen, Minjie Wu, et al. Structural design and synthesis of naphthalene-containing phthalonitrile polymer with excellent processability and high temperature properties. *Journal of Polymer Science*. 2023; 61(19):2292-2302.
3. Abid M.K., Abbas I. M.M., Abid N.K., Jwad M.K. Investigate the thermal analysis properties of polymer electrolyte. *Journal of Physics: Conference Series*. 2021; 2114:012048. DOI: 10.1088/1742-6596/2114/1/012048
4. Billah K.M.M., Lorenzana F.A.R., Martinez N.L., Chacon S., Wicker R.B., Espalin D. Thermal analysis of thermoplastic materials filled with chopped fiber for large area 3D printing. *Solid Freeform Fabrication 2019: Proceedings of the 30th Annual International Solid Freeform Fabrication Symposium : an Additive Manufacturing Conference Texas. August*. 2019; 892-898.
5. *Thermal analysis of polymers: fundamentals and applications*. J.D. Menczel, R.B. Prime (ed.). John Wiley & Sons, Publ., 2008; 688.
6. Ehrenstein G.W., Riedel G., Trawiel P. *Thermal Analysis of Plastics: Theory and Practice*. Carl Hanser Verlag: Munich, Germany. 2004; 400. URL: <https://api.semanticscholar.org/CorpusID:138988997>
7. Bezzaponnaya O.V. Study of oxidative-destructive processes occurring in fire retardant compositions of the intumescent type over time using the method of thermal analysis. *Technosphere safety*. 2018; 3(20):66-71. (rus).
8. Hohenwarter D., Mattausch H., Fischer C., Berge M., Haar B. Analysis of the Fire Behavior of Polymers (PP, PA 6 and PE-LD) and their Improvement Using Various Flame Retardants. *Materials*. 2020; 13:5756. DOI: 10.3390/ma13245756
9. Bezzaponnaya O.V., Luzina M.D., Dinislamov M.M. Application of the method of synchronous thermal analysis to assess the flammability of substances and materials. *Technosphere Safety*. 2022; 4(37):127-140. (rus).
10. Mokryak A.Yu., Cheshko I.D., Eliseev Yu.N., Princeva M.Yu. *On the role of burning polymers in the occurrence and development of fire. Investigation of fires : collection of articles*. St. Petersburg, St. Petersburg University of the State Fire Service of the Ministry of Emergency Situations of Russia, 2019; 6:119-124. (rus).
11. Cheshko I.D., Princeva M.Yu., Lobanova O.V. Instrumental methods in modern fire-technical examination. *Supervision activities and forensic examination in the security system*. 2020; 4:29-41. (rus).
12. Koptelov A.A., Koptelov I.A., Rogozina A.A., Yushkov E.S. Possibilities of thermal analysis methods in application to the study of the kinetics of thermal decomposition of polymers. *Zhurnal prikladnoj himii / Journal of Applied Chemistry*. 2016; 89(9):1163-1169. (rus).
13. Charde S.J., Sonawane S.S., Sonawane S.H., Shimpic N.G. Degradation Kinetics of Polycarbonate Composites. *Chemical and Biochemical Engineering Quarterly*. 2018; 32(2):151-165. DOI: 10.15255/CABEQ.2017.1173
14. Fateh T., Richard F., Rogaume T., Joseph P. Experimental and modeling studies on the kinetics and mechanisms of thermal degradation of polymethyl methacrylate in nitrogen and air. *Journal of Analytical and Applied Pyrolysis*. 2016; 120:423-433. DOI: 10.1016/j.jaap.2016.06.014
15. Bezzaponnaya O.V., Khabibova K.I. Application of the thermal analysis method in the identification of thermoplastics and thermosets within the framework of fire-technical examination. *Technosphere Safety*. 2022; 34:85-91. (rus).
16. Bezzaponnaya O.V., Golovina E.V., Akulov A.Yu. Identification control of fire retardant compositions of intumescent type using thermal analysis methods. *Technosphere Safety*. 2019; 1(22):52-57. (rus).
17. Bezzaponnaya O.V. Assessment of the impact temperature on wood under fire conditions using thermal analysis methods. *Technosphere Safety*. 2020; 3(28):70-80. (rus).
18. Mokryak A.Yu., Eliseev Yu.N., Cheshko I.D. On the fire hazardous properties of overhead LED lamps. *Fire Investigation : collection of Articles*. St. Petersburg, St. Petersburg University of the State Fire Service of the Ministry of Emergency Situations of Russia, 2019; 6:108-118. (rus).
19. Princeva M.Yu., Cheshko I.D. Application of thermal analysis in expert research on fire cases. *Current Problems of Ensuring Fire Safety and Protection from Emergency Situations : collection of articles based on the materials of the All-Russian Scientific and Practical Conference*. Zheleznogorsk, Federal State Budgetary Educational Institution of Higher Education Siberian Fire and Rescue Academy, 2019; 260-270. (rus).
20. Princeva M.Yu., Lobova S.F. Application of thermal analysis to calculate the kinetic parameters of thermal destruction of polymers when performing fire reconstruction. *Modern fire-safe materials and technologies : collection of materials of the IV International scientific and practical conference dedicated to the 30th anniversary of the Ministry of Emergency Situations of Russia*. Ivanovo, 2020; 95-99. (rus).

Поступила 27.10.2023, после доработки 07.11.2023;
принята к публикации 15.11.2023

Received October 27, 2023; Received in revised form November 7, 2023;
Accepted November 15, 2023

Информация об авторах

БЕЗЗАПОННАЯ Оксана Владимировна, кандидат технических наук, доцент, почетный работник науки и высоких технологий РФ, профессор кафедры криминалистики и инженерно-технических экспертиз Уральского института ГПС МЧС России, Россия, 620062, г. Екатеринбург, улица Мира, 22; РИНЦ ID: 119257; Scopus AuthorID 6504618195; ResearcherID R-8727-2019; ORCID 0000-0001-6566-448X; e-mail: bezzaponnay@mail.ru

МАКАРКИН Сергей Викторович, кандидат юридических наук, доцент, начальник кафедры криминалистики и инженерно-технических экспертиз Уральского института ГПС МЧС России, Россия, 620062, г. Екатеринбург, улица Мира, 22; РИНЦ ID: 374148; ORCID: 0009-0001-8268-5677; e-mail: mak_s@el.ru

ГЛУХИХ Павел Александрович, старший преподаватель кафедры криминалистики и инженерно-технических экспертиз Уральского института ГПС МЧС России, Россия, 620062, г. Екатеринбург, улица Мира, 22; РИНЦ ID: 814811; ORCID: 0009-0000-9084-8328; e-mail: pasa.86@mail.ru

Вклад авторов:

Беззапонная О.В. — идея; проведение исследований и обработка результатов; написание и научное редактирование статьи.

Макаркин С.В. — сбор материала; обработка материала.

Глухих П.А. — сбор материала; обработка материала.

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Information about the authors

Oksana V. BEZZAPONNAYA, Cand. Sci. (Eng.), Associate Professor, Honorary Worker of Science and High Technologies of the Russian Federation, Professor of the Department of Criminalistics and Engineering and Technical Expertise of the Ural Institute of the State Fire Service of the Ministry of Emergency Situations of Russia, Russia, 620062, Ekaterinburg, Mira St., 22; ID RSCI: 119257; Scopus AuthorID 6504618195; ResearcherID R-8727-2019; ORCID 0000-0001-6566-448X; e-mail: bezzaponnay@mail.ru

Sergey V. MAKARKIN, Candidate of Legal Sciences, Associate Professor, Head of the Department of Criminalistics and Engineering and Technical Expertise, Ural Institute of the State Fire Service of the Ministry of Emergency Situations of Russia, Russia, 620062, Ekaterinburg, Mira St., 22; ID RSCI: 374148; ORCID: 0009-0001-8268-5677; e-mail: mak_s@el.ru

Pavel A. GLUKHIKH, senior lecturer of the Department of Criminalistics and Engineering and Technical Expertise, the Ural Institute of the State Fire Service of the Ministry of Emergency Situations of Russia, Russia, 620062, Ekaterinburg, Mira St., 22; ID RSCI: 814811; ORCID: 0009-0000-9084-8328; e-mail: pasa.86@mail.ru

Contribution of the authors:

Oksana V. Bezzaponnaya — idea; research and processing of results; writing and scientific editing of the article.

Sergey V. Makarkin — collection of material; processing of material.

Pavel A. Glukhikh — collection of material; processing of material.

The authors declare no conflicts of interests.

Влияние длительного естественного старения бумаги на ее свойства и термическую устойчивость

Алена Андреевна Румянцева¹, Илья Олегович Федотов²✉, Андрей Борисович Сивенков¹, Юрий Кузьмич Нагановский³

¹ Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет, г. Москва, Россия

² Академия Государственной противопожарной службы Министерства Российской Федерации по делам гражданской обороны, чрезвычайным ситуациям и ликвидации последствий стихийных бедствий, г. Москва, Россия

³ Всероссийский ордена «Знак Почета» научно-исследовательский институт противопожарной обороны Министерства Российской Федерации по делам гражданской обороны, чрезвычайным ситуациям и ликвидации последствий стихийных бедствий, Московская обл., г. Балашиха, Россия

АННОТАЦИЯ

Введение. В процессе естественного старения в целлюлозных материалах происходят процессы, приводящие к изменению свойств и трансформации структуры материала. Исследование физико-химических превращений в бумаге естественного старения, их влияния на термическую стабильность и пожароопасные свойства материала имеют ограниченный характер.

Цель исследования. Установление физико-химических свойств и термической устойчивости бумаги естественного старения.

Задачи:

- изучить физико-химические свойства бумаги различного периода издания (1946–2020 гг.);
- провести оценку термических характеристик бумаги методами термического анализа с установлением кинетических параметров процесса терморазложения, а также характеристик тепловыделения.

Методы исследования. Исследование проводилось для образцов бумаги различного года издания (1946–2020 гг.). Для исследования задействованы ИК-Фурье спектрометр Bruker, а также методы термического анализа.

Результаты и их обсуждение. По результатам исследования установлено, что в процессе старения бумаги образуются продукты гидролизной дестабилизации лигноуглеводных компонентов с нарушением морфологической структуры материала (снижение плотности до 20 %).

При пиролизе для бумаги естественного старения установлено смещение участка максимальной скорости разложения в низкотемпературную область. Наибольшее снижение энергии активации (до 450 °С) получено для бумаги 1946 г. ($E_a = 92,9–185,8$ кДж/моль). Термоокислительное разложение бумаги естественного старения на стадии 160...450 °С характеризуется более значительной потерей массы (до 48 %). Установлено расширение температурных границ стадии окисления угольного остатка для пиролиза до 35, а для термоокислительного разложения до 45 %, что способствует повышению общего тепловыделения до 47 %.

Выводы. Результаты свидетельствуют о значительной потере химической и термической устойчивости бумаги в результате естественного старения с протеканием гидролизной дестабилизации лигноуглеводного комплекса. Установлены физико-химические изменения, характерные для бумаги естественного старения, нарушение ее морфологической структуры. Стадия окисления угольного остатка характеризуется расширением температурных границ окислительной реакции, имеющей значительный экзотермический эффект.

Ключевые слова: гемицеллюлозы; целлюлоза; лигнин; инфракрасный спектр; термодеструкция; термический анализ; энергия активации; тепловыделение

Для цитирования: Румянцева А.А., Федотов И.О., Сивенков А.Б., Нагановский Ю.К. Влияние длительного естественного старения бумаги на ее свойства и термическую устойчивость // Пожаровзрывобезопасность/ Fire and Explosion Safety. 2024. Т. 33. № 1. С. 36–50. DOI: 10.22227/0869-7493.2024.33.01.36-50

✉ Федотов Илья Олегович, e-mail: ilafedotov367@gmail.com

Influence of long-term natural aging of paper on its properties and thermal stability

Alena A. Rumyantseva¹, Ilya O. Fedotov²✉, Andrey B. Sivenkov¹, Yuriy K. Naganovskiy³

¹ Moscow State University of Civil Engineering (National Research University), Moscow, Russian Federation

² The State Fire Academy of the Ministry of Russian Federation for Civil Defense, Emergencies and Elimination on Consequences of Natural Disasters, Moscow, Russian Federation

³ All-Russian Research Institute for Fire Protection of Ministry of Russian Federation for Civil Defense, Emergencies and Elimination of Consequences of Natural Disasters, Balashikha, Moscow Region, Russian Federation

ABSTRACT

Introduction. During natural aging, processes occur in cellulosic materials that lead to changes in properties and transformation of the material structure. The study of physico-chemical transformations in naturally aged paper, their influence on thermal stability and fire hazard properties of the material is limited.

The aim of the research is to establish the physico-chemical properties and thermal stability of naturally aged paper.

Objectives:

- to study the physico-chemical properties of paper of different period of publication (1946–2020);
- to evaluate the thermal characteristics of paper by thermal analysis methods with the establishment of kinetic parameters of the thermal decomposition process, as well as the characteristics of heat release.

Research methods. The research was carried out for paper specimens of different year of publication (1946–2020). Bruker FT-IR spectrometer and thermal analysis methods were used for the research.

Results and their discussion. According to the results of the study it was found that in the process of paper aging hydrolytic destabilization products of lingo-carbohydrate components are formed with disturbance of morphological structure of the material (density reduction up to 20 %).

In pyrolysis for naturally aged paper, a shift of the maximum decomposition rate plot to the low-temperature region was found. The largest decrease in activation energy (up to 450 °C) was obtained for 1946 paper ($E_a = 92.9–185.8$ kJ/mol). Thermal oxidative decomposition of naturally aged paper at the 160...450 °C stage is characterized by a more significant mass loss (up to 48 %). The extension of temperature limits of the stage of oxidation of carbon residue for pyrolysis up to 35 % and for thermal oxidative decomposition up to 45 % was established, which contributes to the increase of total heat release up to 47 %.

Conclusions. The results indicate a significant loss of chemical and thermal stability of paper as a result of natural ageing with the progression of hydrolytic destabilization of the lingo-carbohydrate complex. Physico-chemical changes characteristic for paper of natural aging, violation of its morphological structure were established. The stage of oxidation of the carbon residue is characterized by the expansion of the temperature limits of the oxidation reaction, which has a significant exothermic effect.

Keywords: hemicellulose; cellulose; lignin; natural aging; infrared spectrum; thermal destruction; thermal analysis; activation energy; heat release

For citation: Rumyantseva A.A., Fedotov I.O., Sivenkov A.B., Naganovskiy Yu.K. Influence of long-term natural aging of paper on its properties and thermal stability. *Pozharovzryvbezopasnost/Fire and Explosion Safety*. 2024; 33(1):36-50. DOI: 10.22227/0869-7493.2024.33.01.36-50 (rus).

✉ Ilya Olegovich Fedotov, e-mail: ilafedotov367@gmail.com

Введение

Материалы на основе целлюлозы имеют огромное значение в промышленной, хозяйственно-бытовой и культурной деятельности человека. Ярким и, наверно, одним из наиболее важных представителей этой группы материалов являются бумажные изделия (бумага). Несмотря на значительное развитие сферы цифровых технологий, изделия на основе бумаги не утратили своей функциональной значимости. По-прежнему значение бумажных документов в качестве носителей информации имеет глобальное значение во всем мире.

По своей морфологии бумага представляет собой материал на основе растительных волокон с добавлением различных функциональных компонентов и минеральных добавок, таких как каолин, мел и др. Древесная целлюлоза вот уже многие десятилетия остается главным сырьевым компонентом для целлюлозно-бумажной отрасли. При использовании в производстве изготовления бумаги древесной целлюлозы в ее состав совместно вовлекаются фрагменты других компонентов древесины, такие как лигнин,

гемицеллюлозы и другие составные части древесного комплекса. Современные технологии бумажного производства позволяют получать более качественные материалы и минимизировать включение различных древесных компонентов и примесей в состав бумаги [1–3].

Большое многообразие видов и сортов бумаги (копировальная бумага, книжно-журнальная и газетная бумага, картон, калька, ватман, обойная бумага, упаковочная и оберточная бумага и многие др.) относит данный материал в отдельную важнейшую группу целлюлозосодержащих материалов. Известность бумага получила благодаря полученной оригинальной технологии использования материалов на природной растительной основе еще в Древнем Китае более двух тысяч лет назад. Так, изделия в виде папируса служили в качестве основного носителя информации и многие из этих рукописных документов сохранились до наших дней.

Важнейшими культурно-историческими центрами хранения бумажных изделий (книги, журналы, газеты, архивные документы и т.д.) являются библио-

теки, книгохранилища, архивы, имеющие на хранении бумажные носители информации со сроками издания от нескольких десятков и даже сотен лет. Несомненно, такие объекты имеют особенности и специфику обеспечения их пожарной безопасности, имея на хранении от нескольких тысяч до нескольких миллионов экземпляров бумажных изданий.

Сама по себе бумага, как и другие материалы на основе целлюлозы, например древесина разных видов [4, 5], может характеризоваться в целом как материал с высокой пожарной опасностью (температура воспламенения 230–250 °С, температура тления 360 °С, массовая скорость выгорания 5,5 кг/(м²·с) в виде книг на стеллажах), имея значительный потенциал горючести и тепловыделения, а также выделения токсичных продуктов горения и дымообразования [6].

Объективная оценка пожарной опасности бумажных материалов является необходимым условием установления особенностей развития пожара в зданиях, где основной пожарной нагрузкой является бумага. Изучение пожарных сценариев имеет чрезвычайно важную роль при осуществлении прогнозной оценки безопасности людей в случае возникновения пожара. В этой связи влияние различных внешних и внутренних факторов на пожарную опасность материалов на основе бумаги имеет важнейшее значение. Одним из таких факторов является год выпуска или период выдержки в условиях окружающей среды печатных и рукописных бумажных изданий как результат длительного естественного старения материала.

Естественное старение под воздействием факторов окружающей среды характерно для любого материала, однако этот физико-химический процесс зависит от его химической природы, продолжительности и условий эксплуатации. Как было установлено ранее, в большинстве случаев процесс старения для различных материалов и конструкций ведет к ухудшению их технического состояния и эксплуатационных характеристик [7–13]. Изучению свойств материалов на основе бумаги с учетом процесса ускоренного старения были посвящены некоторые научные работы [14, 15], однако механизм естественного старения этих материалов остается до конца неизученным. В этой связи проведение исследований в отношении особенностей горения и пожароопасности бумажного материала с учетом различного времени естественной выдержки имеет весьма актуальный характер.

Целью исследования является установление физико-химических свойств и термической устойчивости бумаги различного года издания.

Для реализации поставленной цели были решены следующие задачи:

- изучить физико-химические свойства бумаги различного периода издания (1946–2020 гг.) с установлением характерных изменений в материале в результате естественного старения;
- идентифицировать основные процессы, происходящие в бумаге в результате длительного естественного старения, методом инфракрасной спектроскопии;
- провести оценку термических характеристик образцов бумаги методами термического анализа с установлением кинетических параметров процесса термического и термоокислительного разложения исследуемых образцов;
- оценить значения характеристик тепловыделения для газовой и твердой фазы в процессе термического и термоокислительного разложения бумажных образцов.

Объекты и методы исследования

Исследование проводилось для образцов бумаги различного года издания (1946–2020 гг.). Для исследования задействованы ИК-Фурье спектрометр Bruker, а также методы термического анализа.

Результаты исследования и их обсуждение

Ранее полученные результаты в отношении материалов на основе целлюлозы естественного и искусственного старения, например древесины различных пород и видов, подтверждают значимость временного фактора при оценке пожарной опасности и огнестойкости деревянных конструкций [16].

В результате продолжительной эксплуатации в древесине различных пород были обнаружены изменения в ее морфологической структуре и в химическом составе лигноуглеводного комплекса, включающего такие основные компоненты, как: целлюлоза, лигнин, гемицеллюлозы, экстрактивные вещества и другие соединения. Многие работы, направленные на изучение изменения свойств и структуры бумаги, базируются на результатах исследования материалов искусственного старения. Результаты этих исследований являются основой для разработки технологий получения долговечной и устойчивой к старению бумаги [17, 18]. Так, показательными являются работы [15, 19], которые связаны с изучением термической и физико-химической стабильности бумаги искусственного старения. В работе было показано, что в процессе ускоренного старения в специальных температурно-влажностных условиях происходит изменение субмикроскопической структуры материала, размеров и формы волокон, пористости бумаги из различных видов целлюлозы (сульфатная беленая хвойная и лиственная целлюлоза, их смеси, а также сульфитная беленая хвойная целлюлоза). Важным,

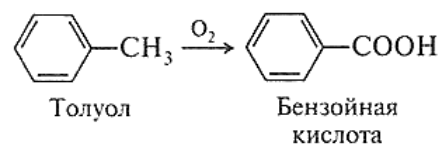
с точки зрения поведения материалов в условиях пожара, возникновения и протекания беспламенного горения (тления), является повышение удельной поверхности материала в условиях ускоренного старения. Так, для образцов бумаги из сульфатной хвойной целлюлозы удельная поверхность увеличивается на 21 %, а из лиственной целлюлозы — на 47 %. Это происходит вследствие изменения характеристичных размеров целлюлозных волокон, уменьшения общего объема субкапилляров, а для бумаги из лиственной целлюлозы — в результате разрушения мелких сосудов. Данные структурные изменения, а также необратимые физико-химические превращения оказывают влияние на особенности термических превращений бумаги [15, 17, 19]. Было показано, что для бумаги искусственного старения в специальных термовлажностных условиях характерно снижение термической стабильности, а именно: термодеструкция начинается и заканчивается при более низкой температуре, наблюдается снижение значений энергии активации данного процесса (до 30 %). Интересно отметить, что более устойчивой к термическому разрушению является бумага из лиственной целлюлозы в сравнении с бумагой из хвойной древесной целлюлозы. Кроме этого, установлено, что композиционные виды бумаг из смеси волокон обладают более повышенной устойчивостью к действию процесса старения. Проведенное исследование свидетельствует, что в процессе старения в бумаге происходят процессы, которые приводят к необратимому изменению ее физико-химических свойств. Несмотря на полученные результаты, несомненно, представляет актуальность более подробное изучение различных видов бумаги различных сроков естественной выдержки, позволяющее оценить степень влияния года выпуска (производства) бумажных материалов на их физико-химическую сущность и пожароопасность. Авторами определена необходимость изучения особенностей поведения материалов на основе бумаги, имеющих различный год выпуска, в условиях высокотемпературного нагрева (пожара). В целом исследование направлено на установление возможного повышения пожарной опасности бумажных материалов с увеличением длительности естественного старения, а также интенсивности развития пожара в зданиях, имеющих на хранении значительное количество пожарной нагрузки в виде материалов на основе бумаги (библиотеки, книгохранилища, архивы и пр.).

В своем исследовании авторский коллектив априори придерживался мнения, что во время длительного естественного старения в бумаге различных видов происходят необратимые обратимые изменения, приводящие к изменению ее химического состава и термической стабильности.

При отборе образцов для исследования авторами было отмечено изменение цвета бумаги от светло-серого до серо-желтого и желтого оттенка, особенно для образцов с годом выпуска более 10–15 лет. При этом сопровождающим является устойчивый характерный ароматический запах (ванильный или миндальный), обусловленный наличием в составе естественно состаренной бумаги таких продуктов химических превращений целлюлозы и лигнина, как: бензальдегид, бензойная кислота, ванилин, фурфурол, этилбензол и другие альдегиды и соединения (табл. 1).

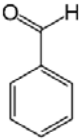
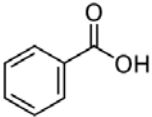
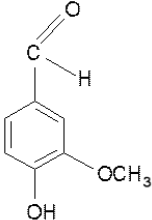
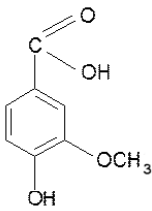
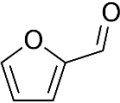
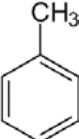
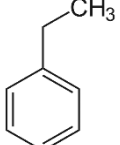
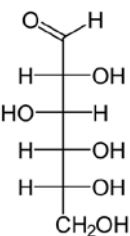
Для отдельных образцов даже с периодом их издания более 20 лет было отмечено отсутствие явных признаков процесса старения, что связано, по всей видимости, с видом и качеством бумаги, имеющей в своем составе минимальное количество нецеллюлозных древесных органокомпонентов. Очевидно, что во многом интенсивность процесса естественного старения связана с видом и химической природой компонентов, используемых при изготовлении бумаги, а также условиями ее хранения.

Представленные в табл. 1 вещества можно идентифицировать в процессе длительного естественного старения бумаги на основе древесной целлюлозы как результат химических превращений основных компонентов древесного комплекса, а также дальнейших преобразований реакционно-способных промежуточных продуктов процесса гидролиза. Так, например, бензальдегид и толуол под воздействием кислорода воздуха могут переходить в бензойную кислоту. В результате окислительной и гидролитической деструкции протекают известные химические реакции с участием основных и промежуточных продуктов:



Образующиеся продукты не просто визуально изменяют состояние бумажных образцов, но и оказывают фактическое влияние на все свойства бумаги, в том числе на ее термическую устойчивость. Например, образующийся в результате кислотного гидролиза целлюлозы, а также других представителей дисахаридов и полисахаридов, моносахарид глюкоза обладает температурой разложения 188 °С, температурой воспламенения 234 °С, температурой самовоспламенения 390 °С, тогда как целлюлоза имеет значения данных характеристичных температур 210, 275 и 420 °С соответственно. Это может свидетельствовать о том, что в целом бумага в результате длительного естественного старения может более интенсивно терять термическую стабильность

Таблица 1. Характерные вещества, образующиеся в результате длительного естественного старения бумаги на основе древесной целлюлозы**Table 1.** Characteristic substances formed as a result of long-term natural aging of wood pulp-based paper

Наименование вещества Name of the substance	Структурная формула вещества Structural formula of the substance	Характерные пожароопасные температуры [8] Typical fire-hazardous temperatures [8]
Бензальдегид Benzaldehyde		Температура вспышки 64 °С; температура воспламенения 192 °С; температура самовоспламенения 360 °С Flash point 64 °C; ignition temperature 192 °C; auto-ignition temperature 360 °C
Бензойная кислота Benzoic acid		Температура вспышки 121 °С; температура разложения 370 °С; температура воспламенения 146 °С; температура самовоспламенения 532 °С Flash point 121 °C; decomposition temperature 370 °C; ignition temperature 146 °C; auto-ignition temperature 532 °C
Ванилин Vanillin		Температура вспышки 154 °С; температура воспламенения 160 °С; температура самовоспламенения аэрозвеси 366 °С Flash point 154 °C; ignition temperature 160 °C; auto-ignition temperature of the air suspension 366 °C
Ванилиновая кислота Vanillic acid		Температура вспышки 149,4 °С; температура самовоспламенения > 400 °С Flash point 149.4 °C; auto-ignition temperature > 400 °C
Фурфурол Furfural		Температура вспышки 64 °С; температура самовоспламенения 298 °С Flash point 64 °C; self-ignition temperature 298 °C
Толуол Toluene		Температура вспышки 7 °С; температура самовоспламенения 535 °С Flash point 7 °C; auto-ignition temperature 535 °C
Этилбензол Ethylbenzene		Температура вспышки 20 °С; температура самовоспламенения 431 °С Flash point 20 °C; auto-ignition temperature 431 °C
Декстроза (D-глюкоза) Dextrose (D-glucose)		Температура разложения 188 °С; температура воспламенения 234 °С; температура самовоспламенения аэрозвеси 403 °С Decomposition temperature 188 °C; ignition temperature 234 °C; auto-ignition temperature of the air suspension 403 °C

в результате воздействия повышенных температур. Для бумаги естественного старения в аспекте изменения физико-химических и пожароопасных характеристик системные исследования фактически не проводились.

Для проведения исследования авторами было отобрано 10 образцов бумаги, пошедшей на утилизацию, различного периода издания с 1946 по 2020 гг. (годы издания 1946, 1953, 1960, 1968, 1978, 1979, 1985, 1993, 2019, 2020). Влажность образцов бумаги изменялась в пределах 4,5–6,4 %. Характеристики образцов представлены в табл. 2.

С химико-технологической точки зрения рассматриваемые образцы бумаги имеют принципиальные отличия. Бумага 2020 и 2019 гг. (офсетная бумага) получена из полубеленой целлюлозы хвойных и лиственных пород древесины с добавлением мела. Бумага 1960, 1979, 1985, 1993 года издания представляет собой типографскую бумагу № 2 с содержанием древесной массы до 50 %. Бумага 1978, 1968, 1953, 1946 года издания идентифициро-

вана как типографская бумага № 3, состоящая полностью из древесной массы. Для всех отобранных образцов, кроме образцов с годом выпуска 2019 и 2020, отмечены характерные органолептические изменения. Кроме этого, для большинства образцов установлено снижение плотности бумаги более чем на 20 % (см. табл. 2), что может свидетельствовать о деструктивных изменениях в волокнообразующей структуре материала и повышении его внутренней удельной поверхности. Априори повышение удельной поверхности целлюлозосодержащего материала должно привести к интенсификации его тлеющего (беспламенного) горения.

В оценке изменения химической сущности и термической устойчивости бумаги длительного естественного старения был задействован ИК-Фурье спектрометр Bruker (в диапазоне частот 4000...500 см⁻¹ с разрешением 2 см⁻¹), а также методы термического анализа на термовесах ТГА-951 термоанализатора «Du Pont 9900» (термогравиметрия (ТГ), дифференциальная термогравиметрия (ДТГ), дифференциальная сканирующая калориметрия (ДСК)), широко используемых в международной практике исследования физико-химических и пожароопасных свойств полимерных материалов [20–23].

Цель исследования заключалась в оценке степени физико-химических преобразований бумаги естественного старения и особенностей процесса ее термического (пиролиз) и термоокислительного разложения, а также кинетических параметров этих процессов. Для экспресс-оценки кинетических параметров использованы данные дифференциально-сканирующей калориметрии (Метод Борхардта и Дэниельса).

Условия проведения термического анализа объектов исследования выбраны таким образом, чтобы максимально выявить изменения в ходе термических превращений исследуемых образцов и определить по характерным точкам соответствующие закономерности основных процессов термического разложения в заданных условиях испытаний. Условия проведения термического анализа образцов были приняты следующими¹:

- скорость нагревания 5, 10, 20 °С/мин; атмосфера — азот до 500 °С, далее воздух;
- скорость нагревания 20 °С/мин; атмосфера — воздух.

Оценка энергии активации (E_a , кДж/моль), логарифма предэкспоненты ($\log Z$, мин⁻¹), оценивается для характерных стадий разложения образцов бумаги:

¹ Альменбаев М.М., Анохин Е.А., Макишев Ж.К., Полищук Е.Ю., Сивенков А.Б. Термический анализ древесины различного срока эксплуатации с огнезащитными составами // Технологии технической безопасности. 2016. № 3 (67). С. 22–32. URL: <http://ipb.mos.ru/ttb/2016-3>

Таблица 2. Характеристика образцов бумаги

Table 2. Characteristics of paper specimens

Номер образца Specimen Number	Наименование образца, год издания Name of the specimen, year of publication	Плотность образцов бумаги, г/м ³ Density of paper specimens, g/m ³
1	Офсетная бумага, 2020 г. Offset paper, 2020	75,0
2	Офсетная бумага 2019 г. Offset paper, 2019	80,0
3	Типографская бумага № 2, 1993 г. Printing paper No. 2, 1993	63,5
4	Типографская бумага № 2, 1985 г. Printing paper No. 2, 1985	62,3
5	Типографская бумага № 2, 1979 г. Printing paper No. 2, 1979	77,3
6	Типографская бумага № 3, 1978 г. Printing paper No. 3, 1978	71,3
7	Типографская бумага № 3, 1968 г. Printing paper No. 3, 1968	59,3
8	Типографская бумага № 2, 1960 г. Printing paper No. 2, 1960	81,3
9	Типографская бумага № 3, 1953 г. Printing paper No. 3, 1953	63,8
10	Типографская бумага № 3, 1946 г. Printing paper No. 3, 1946	72,3

- основная стадия — 200–450 °С;
- стадия окисления угольного остатка — 450–650 °С.

Для проведения исследования готовятся образцы (навески) в виде фрагментов правильной формы. Навеска образцов изменяется в пределах 4,0–8,0 мг. В ходе испытаний проводилась оценка параметров (температурные диапазоны указаны ориентировочно):

- потеря массы, % (в интервале 50...180 °С);
- потеря массы, % (в интервале 180...450 °С);
- максимум ДТГ (T , °С/А, %/мин⁻¹) (в интервале 180...450 °С);
- скорость окисления угольного остатка, %/мин⁻¹ (в интервале 450...650 °С);
- теплота пиролиза, Дж/г (азот);
- тепловой эффект, Дж/г (воздух);
- теплота окисления угольного остатка, Дж/г (воздух).

По результатам анализа ИК-спектров можно сделать вывод, что полосы поглощения от 1700 до 4000 см⁻¹ характеризуют типичные участки изменения пиковых значений волновых чисел для целлюлозных материалов, особенно в диапазоне от 3000 до 3700 см⁻¹ [23, 24]. Интенсивность поглощения имеет тенденцию снижения для образцов длительного естественного старения, что может свидетельствовать о возможном предгидролизном или гидролизном состоянии целлюлозы. Этот диапазон волновых чисел характеризуется валентными колебаниями гидроксогрупп целлюлозы, вовлеченных внутри- и межмолекулярными связями (3700–3100 см⁻¹), С-Н-связями в метиленовых (2945, 2853, 2914, 2897, 2870, 2970 см⁻¹) и в метиновых группах (3000–2800 см⁻¹) [23, 25].

При протекании процессов гидролитической и окислительной деструкции часть целлюлозных полисахаридов преобразуется в продукты различной степени гидролиза. Более интенсивные измене-

ния для исследуемых образцов бумаги с 1960, 1979, 1985, 1993, 2020 годами выпуска издания наблюдаются в диапазоне характеристических частот отражения образцов от 750 до 1700 см⁻¹ (рис. 1).

В полученных ИК-спектрах (диапазон 1500–900 см⁻¹) просматриваются различные колебания С-Н, С-О и О-Н связей, колебания гликозидной связи и глюкопиранозного кольца целлюлозы, а также структурных групп ароматических углеводородов и продуктов их химических превращений. Гемиллюлозы в виде уроновых кислот идентифицируются по полосе поглощения 1730 см⁻¹ (ν С = О в сложноэфирной группе) (δ С-Н) [25]. Наличие лигнина может быть идентифицировано характеристичной полосой поглощения 1510 см⁻¹. Лигнин также распознается по полосам скелетных колебаний бензольного кольца при значениях волновых чисел 1595 и около 1500–1510 см⁻¹ (1495 и 1515 см⁻¹ для лигнинов лиственной и хвойной древесины соответственно), а также по характеристичной полосе при 1460 см⁻¹. Колебания ароматических фрагментов свойственны для полос поглощения 1600, 1500 и 875 см⁻¹, полоса при 1267 см⁻¹ — валентные колебания группы -С-О-С- и полоса поглощения при 1267 см⁻¹ — валентные колебания метиленовых групп, характерных для лигнина [26]. Анализ результатов, полученных с помощью метода ИК-спектроскопии, позволяет установить вид бумаги с учетом основных характеристических частот поглощения инфракрасного излучения. Обращают на себя внимание пиковые значения частот поглощения 1416 и 850 см⁻¹ для бумаги 2020 г., что характеризуется наличием мела в составе данного образца. В образцах естественного старения подобные характеристичные полосы отражения не обнаружены.

Таким образом, для образцов бумаги на основе древесной целлюлозы длительного естественного старения характерны изменения, связанные с физико-химическими превращениями лигноуглеводных элементов, приводящими к образованию кислотных катализаторов процесса гидролиза и непосредственно гидролизных продуктов, что выражается в частичной деструкции полисахаридов, изменению качества бумаги в условиях естественного старения. Важнейшая роль в сопровождении данных деструктивных процессов лигноуглеводной части в данном случае отводится гидролитической деструкции.

Более интенсивными деструктивными процессами характеризуются условия термического (пиролиз) и термоокислительного разложения материалов. Исследование методами термического анализа (ТА) проводилось на образцах различного года выпуска бумаги (период с 1946 по 2020 г.). Для образцов бумаги (2019 и 2020 гг.) без длительной естественной выдержки (рис. 2) можно наблюдать несколько ярко выраженных температурных интервалов:

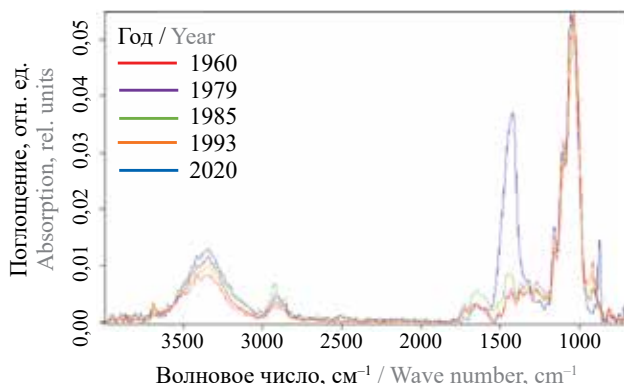


Рис. 1. Результаты ИК-спектроскопии образцов бумаги (цветные спектры соответствуют годам образцов)

Fig. 1. Results of IR spectroscopy of paper specimens (colour spectra correspond to the years of the specimens)

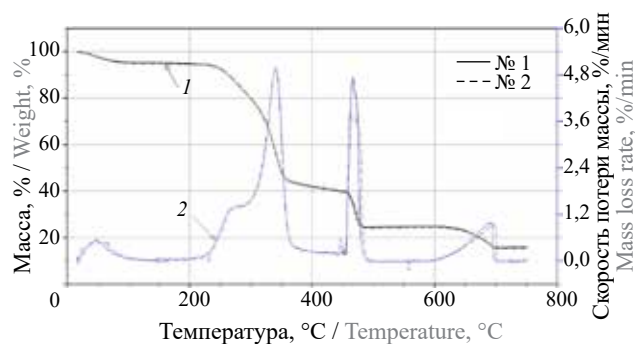


Рис. 2. ТГ (1) и ДТГ (2) кривые образцов № 1 (2020 г.) и № 2 (2019 г.) (атмосфера — азот до 450 °С, далее воздух, 5 °С/мин)
Fig. 2. TG (1) and DTG (2) curves of specimens No. 1 (2020) and No. 2 (2019) (atmosphere nitrogen up to 450 °C, then air, 5 °C/min)

- 30...160 °С — потеря влаги;
- 160...450 °С — деструкция бумаги;
- 450...550 °С — окисление угольного остатка;
- 550...750 °С — разложение мела (в токе воздуха).

ТГ и ДТГ кривые исследуемых образцов естественного старения имеют фактическое совпадение характерных участков во всем температурном диапазоне с небольшим отклонением для 1 и 2-й стадии пиковых максимальных скоростей разложения по температуре (рис. 3).

Для исследуемых образцов бумаги в интервале 160...450 °С, как и для материалов на основе целлюлозы, обнаруживается двухстадийный процесс деструкции, обусловленный процессом терморазложения образца с образованием карбонизованного слоя (1-я стадия) и реакцией его окисления

(2-я стадия). Для бумаги длительного естественного старения с годами выдержки от 29 до 76 лет имеется ярко выраженная двухстадийность процесса термодеструкции образцов в интервале температур 300–350 и 450–510 °С.

Изменение термических характеристик бумаги происходит без тесной взаимосвязи с периодом временной выдержки образцов, что, по всей видимости, обусловлено различными условиями воздействия естественной среды на бумажные материалы, а также особенностями технологии их изготовления (табл. 3).

Для всех исследуемых образцов на стадии до 160 °С происходит сопоставимая потеря влаги в пределах 4,7...6,2 % (см. рис. 3). Для температурной стадии от 160 до 450 °С для всех образцов бумаги длительного естественного старения наблюдается повышение потери массы по сравнению с образцами бумаги без длительной естественной выдержки на 3,63...28,7 %. Кроме этого, установлена тенденция смещения участка наибольшей потери массы образцов бумаги длительного естественного старения в диапазон меньших температур. Так, для образца бумаги со сроком выпуска 76 лет максимальная скорость процесса разложения (кривые ДТГ) реализуется при температуре 326 °С по сравнению с образцами 2020 и 2019 гг. (340 и 339 °С соответственно). Для образцов 2020 и 2019 гг. сказывается также наличие в их составе мела с температурой начала разложения 650–700 °С, что отражается в целом на термо-

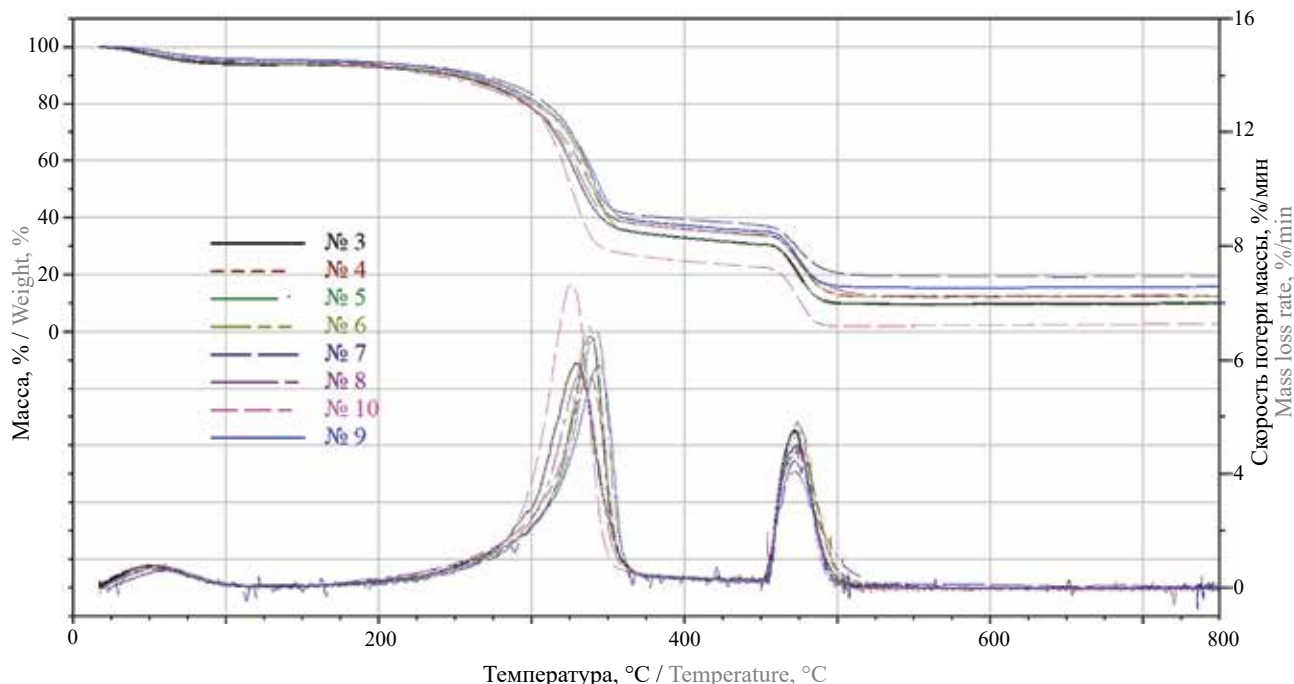


Рис. 3. ТГ и ДТГ кривые образцов бумаги: № 3 (1993), № 4 (1985), № 5 (1979), № 6 (1978), № 7 (1968), № 8 (1960), № 9 (1953), № 10 (1946) (атмосфера — азот до 450 °С, далее воздух, 5 °С/мин)
Fig. 3. TG and DTG curves of paper specimens: No. 3 (1993), No. 4 (1985), No. 5 (1979), No. 6 (1978), No. 7 (1968), No. 8 (1960), No. 9 (1953), No. 10 (1946) (atmosphere nitrogen up to 450 °C, then air, 5 °C/min)

Таблица 3. Результаты термического анализа образцов бумаги (азот до 450 °С, далее воздух)
Table 3. Results of thermal analysis of paper specimens (nitrogen up to 450 °C, then air)

Номер образца Sample Number	Потеря массы, %, в интервале 30...160 °С Mass loss, %, in the range of 30...160 °C	Потеря массы, %, в интервале 160...450 °С Mass loss, %, in the range of 160...450 °C	Потеря массы — кокс (%), в интервале 450...550 °С* Weight loss — coke (%) in the range of 450...550 °C*	ДТГ пики, %/мин DTG peaks, %/min			Скорость окисления кокса, %/мин Coke oxidation rate, %/min	Остаток при 450 °С, % Residue at 450 °C, %	Зола, %, при 750 °С Ash, %, at 750 °C
1	4,9	55,5	15,2	46/0,5	340/4,99	689/0,98	4,7	39,7	15,8
2	5,04	55,0	15,8	48/0,52	339/4,93	697/1,0	3,75	40,0	15,3
3	6,2	63,3	20,99	52/0,6	329/5,9	—	4,16	30,5	9,5
4	5,16	60,7	21,9	50/0,5	337/5,6	—	3,46	34,1	12,2
5	5,91	62,1	21,3	57/0,5	341/6,8	—	4,12	30,7	9,44
6	6,05	60,2	21,6	56/0,56	337/6,9	—	3,7	33,8	12,2
7	5,2	57,4	17,7	51/0,54	337/6,6	—	3,4	37,4	19,6
8	5,8	60,3	21,4	54/0,55	331/5,6	—	3,07	33,9	12,6
9	4,7	60,2	19,8	61/0,45	343/5,8	—	3,7	35,1	15,3
10	5,8	70,8	20,5	51/0,6	326/8,0	—	4,3	22,7	2,1

* Величина кокса определялась по следующему соотношению: КОКС (%) = M_{450} (%) – M_{550} (%).

* The value of coke was determined by the following ratio: COKE (%) = M_{450} (%) – M_{550} (%).

стойкости материала (по величине остатка образца бумаги при температуре 450 °С и величине зольного остатка при температуре 750 °С).

Для образцов бумаги длительного естественного старения наблюдается термическая дестабилизация со смещением 1-й стадии термического разложения материала в низкотемпературную область и повышение скорости потери массы образца. На основной стадии значительная потеря термической устойчивости образцов бумаги в результате длительного естественного старения обусловлена гидролизной деструкцией углеводной части. Это наглядно демонстрируется результатами оценки кинетических параметров (энергия активации, кДж/моль) процесса термического разложения образцов (на 1-й стадии деструкции до 450 °С), рис. 4, а.

Наблюдается тенденция более значительных изменений в термической стабильности образцов при повышении срока выдержки бумаги в естественных условиях (рис. 4, б). Снижение термоустойчи-

вости бумаги естественного старения обусловлено химическими преобразованиями полисахаридной, по сути основной, составляющей бумаги в результате гидролитической деструкции образцов, а также нарушением структуры с формированием более развитой внутренней поверхности (для некоторых образцов установлено снижение плотности бумаги более чем на 20 %), что, по сути, должно сказаться на повышении интенсивности тлеющего горения материала.

Для 2-й стадии температурного распада рассматриваемых образцов бумаги обнаружена особенность протекания стадии окисления угольного остатка, связанная с увеличением продолжительности этого процесса на 30–35 % для образцов естественного старения (расширение температурного диапазона до температурных границ 450–510 °С). По этой причине, несмотря на снижение скорости окисления кокса (%/мин) на 8,5–35 %, вследствие преобразований ароматических соединений и присутствия их фрагментов в коксовом слое, можно

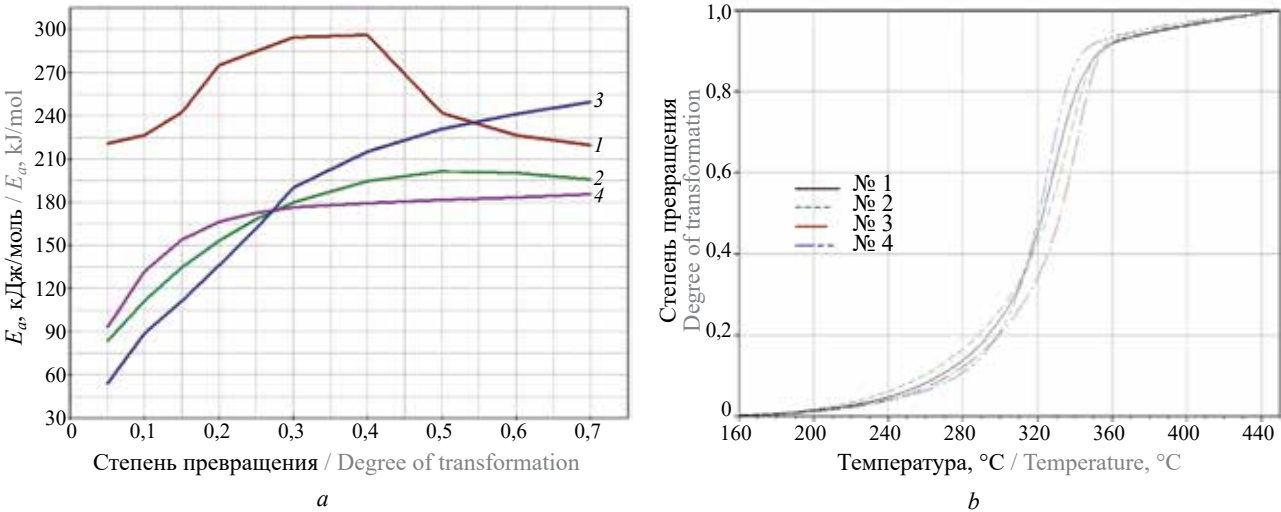


Рис. 4. Зависимость энергии активации от степени превращения (а) (первая стадия деструкции) и степень превращения от температуры (b): 1 — образец № 1 (2020); 2 — образец № 4 (1985); 3 — образец № 8 (1960); 4 — образец № 10 (1946) (атмосфера — азот до 450 °С, скорость нагрева 5 °С/мин)
Fig. 4. The dependence of the activation energy on the degree of transformation (a) (the first stage of destruction) and the degree of transformation on temperature (b): 1 — specimen No. 1 (2020); 2 — specimen No. 4 (1985); 3 — specimen No. 8 (1960); 4 — specimen No. 10 (1946) (nitrogen atmosphere up to 450 °C, heating rate 5 °C/min)

Таблица 4. Результаты термического анализа в совмещенном ТГА – ДСК – АГТ эксперименте (воздух, 20 °С/мин)
Table 4. Results of thermal analysis in a combined TGA – DSC – AGG experiment (air, 20 °C/min)

Образец, год Sample, year	ДТГ максимумы, $t_{\max}$, °C/A, %/мин DTG maxima, $t_{\max}$, °C/A, %/min		$T_{\max\text{ДТГ}}$, °C / ДСК ($\Delta H_{\text{тв}}$), Дж/г $T_{\max\text{DTG}}$, °C / DSC (ΔN_n), J/g		Зола, %, при 650 °C Ash, %, at 650 °C	Тепловыделение в газо- вой фазе ($\Delta H_{\text{г}}$), Дж/г Heat release in the gas phase (ΔN_{gg}), J/g	Общее тепло- выделение, Дж/г Total heat dissipation, J/g
	Потеря массы, % Mass loss, %						
	150...550 °C		150...550 °C				
1	349/35,9	428/28,3	362	437	10,7	1172	5154
	73,4		4349 – 367 = 3982				
2	338/29,2	427/28,3	363	427	11,94	1365	5960
	72,6		4871 – 276 = 4595				
3	333/41,2	460/6,31	357	470	4,92	2207	7597
	88,9		5390				
4	334/52,2	465/5,85	348	474	12,7	1884	7148
	82,8		5264				
5	434/53,0	455/6,0	353	465	10,4	1888	6812
	84,4		4924				
6	336/50,9	461/6,44	355	469	5,79	1853	7543
	88,7		5690				
7	335/50,9	465/5,75	343	477	9,87	1942	6902
	83,4		4960				
8	332/39,5	5,38	355	471	10,4	1469	6318
	83,5		4849				
9	338/43,6	451/5,62	358	466	13.7	1888	5670
	80,8		3782				
10	326/42,9	458/22,9	361	465	2.81	1643	6143
	96,9		4500				

наблюдать повышение потери массы (на 14–30 %) в интервале температур 450–550 °C и снижение величины золы (на 3–87 %) при температуре 750 °C.

Более значительные термические превращения наблюдаются при термическом анализе в условиях атмосферы воздуха (скорость нагрева 20 °C/мин). По результатам термического анализа в совмещенном ТГА – ДСК – АГГ эксперименте (ТГА (термогравиметрический анализ) – ДСК (дифференциально-сканирующая калориметрия) – АГГ (анализ горючих газов)) для всех образцов естественного старения установлено аномальное повышение характеристик тепловыделения (табл. 4).

Из результатов, представленных в табл. 4, видно, что общее тепловыделение в результате термоокислительной деструкции бумаги естественного старения повышается на 10–32 % по сравнению с образ-

цом 2020 года выпуска. Для образцов бумаги 2019 и 2020 гг. издания после 550 °C наблюдается присутствие характерного эндопика (эндотермический эффект составил 367 Дж/г), обусловленного наличием в составе мела.

Характер кривых термического анализа бумаги естественного старения может быть сопоставим непосредственно с древесиной, имеющей в своем составе различные лигноуглеводные компоненты. Просматривается общая двухстадийная температурная зональность для целлюлозосодержащих материалов [25, 27]. Вместе с этим для рассматриваемых образцов можно выделить характерные особенности процесса термоокислительной деструкции. Анализ процесса двухстадийного термоокислительного разложения свидетельствует о том, что на стадии формирования угольного слоя для бумаги естествен-

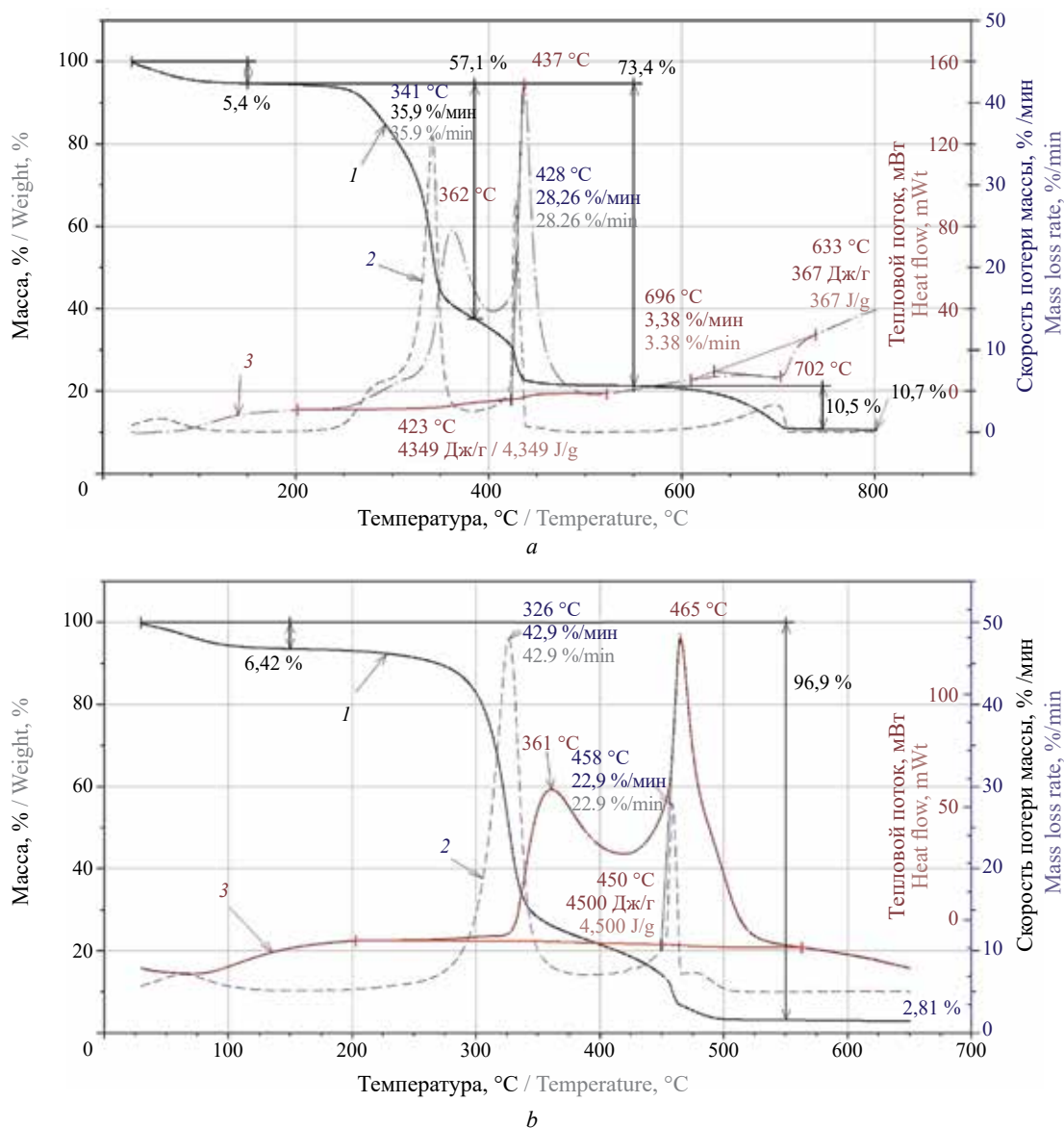


Рис. 5. ТГ (1), ДТГ (2) и ДСК (3) кривые: а — образец бумаги № 1; б — образец бумаги № 10 (атмосфера — воздух, 20 °C/мин)
Fig. 5. TG (1), DTG (2) and DSC (3) curves: a — paper specimen No. 1; b — paper specimen No. 10 (atmosphere — air, 20 °C/min)

ного старения происходит ускорение потери массы (на 10–48 %) со смещением экзопика в низкотемпературную область. Подобные результаты также были получены для основной стадии (1-я стадия) при термическом анализе образцов бумаги в условиях инертной среды. Однако же в среде воздуха обнаружена тенденция смещения реакционно-окислительного процесса угольного остатка в более высокотемпературную область со значительным уменьшением амплитудного показателя (A , %/мин). Полученные результаты, как и в случае термогравиметрических испытаний образцов в инертной среде, обнаруживают расширение диапазона окислительных реакций угольного остатка до 33–45 %, что фактически определяет повышение потери массы для образцов естественного старения в интервале температур 150–550 °C на 10–25 %, а также снижение величины золы при температуре 650 °C для некоторых образцов до 74 % (образец бумаги 1946 года выпуска). Таким образом, в среде воздуха для бумаги естественного старения установлено более продолжительное протекание реакции окисления угольного слоя со смещением этой стадии в область более высоких температур (451–465 °C, сдвиг температурного участка на 5–9 %).

Имея соответствующую угольную структуру и наличие в ней фрагментов ароматической природы, являющихся высокоэнергичными соединениями, можно наблюдать заметное повышение значений тепловыделения (кривые ДСК) в интервале температур 150–550 °C, рис. 5.

Полученные результаты позволяют выявить тенденцию повышения значений общего тепловыделения (до 47 %), включающего в себя выделение тепла как в газовой, так и в твердой фазе. Расширение границ температурного диапазона окисления карбонизата для бумаги длительного естественного старения, присутствие в угольном остатке высокоэнергетических ароматических соединений, а также трансформационных преобразований в волокнообразующей структуре состаренных образцов предопределяют

более высокую продолжительность процесса тепловыделения.

Выводы

В статье представлены результаты влияния длительного естественного старения бумаги на ее физико-химические превращения и особенности процесса термического (пиролиз) и термоокислительного разложения. Исследуемый временной период естественной выдержки бумажных образцов различных видов составил с 1946 по 2020 гг.

Полученные результаты свидетельствуют о значительной потере химической и термической стабильности бумаги в результате естественного старения с протеканием гидролизной дестабилизации лигно-углеводного комплекса. Установлены визуальные поверхностные изменения, характерные для образцов бумаги естественного старения, деструктивное нарушение морфологической структуры материала, а также идентифицированы различные соединения, характеризующие химическую сущность исследуемых образцов.

Процесс термического разложения (пиролиз) образцов характеризуется на основной стадии (160–450 °C) повышением интенсивности потери массы образцов. В условиях термоокислительного разложения установлена двухстадийность процесса с ускорением потери массы на основной стадии на 10–48 % в зависимости от срока естественной выдержки. Также наблюдается смещение стадии окисления угольного остатка в высокотемпературную область по сравнению с образцами бумаги 2019 и 2020 гг. со снижением интенсивности потери массы образца и скорости окисления кокса. Для стадии окисления угольного остатка как в процессе термического, так и термоокислительного разложения бумаги естественного старения установлена важная особенность расширения температурных границ реакционно-окислительной стадии на 30–35 и 33–45 % соответственно, что предопределяет повышение величины общего тепловыделения.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Alén R. Manufacturing cellulosic fibres for making paper: a historical perspective // *Technological Transformation in the Global Pulp and Paper Industry 1800–2018* / Särkkä T., Gutiérrez-Poch M., Kuhlberg M. (eds.). Springer, Cham. Vol. 23. DOI: 10.1007/978-3-319-94962-8_2
2. Муллина Э.Р., Лыгина Е.Г., Еришова О.В., Пинчукова К.В. Исследование влияния химического состава целлюлозы на физико-механические свойства бумаги // *Современные наукоемкие технологии*. 2015. № 9. С. 56–58.
3. Korolchenko D., Pizhurin A. Simulating operational control of production in lumber house building businesses // *MATEC Web of Conferences*. 2017. Vol. 117. P. 00084. DOI: 10.1051/mateconf/201711700084
4. Корольченко Д.А., Покровская Е.Н., Портнов Ф.А., Кобелев А.А. Дымообразующая способность и токсичность продуктов сгорания древесных материалов при поверхностном модифицировании элементоорганическими соединениями // *Пожаровзрывобезопасность/Fire and Explosion Safety*. 2013. № 10. С. 40–45.

5. Proceedings of the 9th International Conference on Wood & Fire Safety 2020 / Osvaldova L.M., Markert F., Zelinka S.L. (ed.). Springer Cham., 2020. 480 p. DOI: 10.1007/978-3-030-41235-7
6. Корольченко Д.А., Корольченко А.Я. Пожаровзрывоопасность веществ и материалов и средства их тушения : справоч. в 2 ч. / 2-е изд., перераб. и доп. Т. 1. М. : Пожнаука, 2004. 713 с.
7. Лантев А.Б., Николаев Е.В., Колтачков Е.Д. Термодинамические характеристики старения полимерных композиционных материалов в условиях реальной эксплуатации // Авиационные материалы и технологии. 2018. № 3. (52). С. 80–88. DOI: 10.18577/2071-9140-2018-0-3-80-88
8. Заиков Г.Е. Старение, стабилизация и горение полимеров и композитов. О приоритетах в исследованиях // Известия высших учебных заведений. Химия и химическая технология. 2010. Т. 53. Вып. 12. С. 143–145.
9. Zaikov G.E., Buchachenko A.L., Ivanov V.B. Aging of polymers, polymer blends and polymer composites. N.Y. : Nova Science Publ., 2002. Vol. 1. 258 p.
10. Эмануэль Н.М., Бучаченко А.Л. Химическая физика старения полимеров. М. : Наука, 1984. 342 с.
11. Заиков Г.Е. Деструкция и стабилизация полимеров. М. : Изд-во МИТХТ им. М.В. Ломоносова, 1993. 248 с.
12. Zaikov G.E. Degradation and Stabilization of Polymers. N.Y. : Nova Sci. Publ., 1999. 296 p.
13. Заиков Г.Е. Почему стареют полимеры? // Соросовский образовательный журнал. 2000. Т. 6. № 12. С. 48–55.
14. Bausch F., Owusu D.D., Graf J. et al. Shine a light on papyrus: monitoring the aging process // Heritage Science. 2022. Vol. 10. Issue 1. DOI: 10.1186/s40494-022-00687-5
15. Смирнова Е.Г. Влияние состава по волокну на термическую деструкцию бумаги до и после старения // Химия растительного сырья. 2011. № 1. С. 175–178.
16. Sivenkov A.B., Berlin A.A., Mukhamedgaliev B.A., Almenbayev M.M., Makishev Zh.K., Rakhmetulin B.Zh. Fire hazard and fire resistance of wooden structures // Springer Nature Switzerland AG. 2023. Vol. XVI. 269 p. DOI: 10.1007/978-3-031-24074-4.
17. Смирнова Е.Г., Журавлева Н.М., Кизеветтер Д.В., Резник А.С. Перспективы применения хитин-глюканового комплекса *Aspergillus Niger* в композиции электроизоляционных видов бумаги // Химия растительного сырья. 2019. № 3. С. 315–323.
18. Захаров И.В., Захарова Н.Л., Канарский А.В., Казаков Я.В., Попов А.В., Дулькин Д.А. Повышение устойчивости картона к старению пропиткой биомодифицированным глютенном // Известия Санкт-Петербургской лесотехнической академии. 2018. Вып. 222. С. 216–227. DOI: 10.21266/2079-4304.2018.222.216-227
19. Смирнова Е.Г. Воздействие старения на структуру бумаги и составляющих ее волокон // Лесной журнал. 2010. № 3. С. 125–130.
20. Vyazovkin S., Nobuyoshi Koga, Christoph Schick. Handbook of thermal analysis and calorimetry recent advances // Techniques and Applications. 2nd Ed. Elsevier Science. 2018. 800 p.
21. Принцева М.Ю., Чешко И.Д. Термический анализ и инфракрасная спектроскопия газообразных продуктов термической деструкции в экспертном исследовании антиципированной древесины // Пожарная безопасность. 2014. № 3. С. 96–101.
22. Mahdavi Nejad A. Thermal analysis of paper board packaging with phase change material: a numerical study // Journal of Packaging Technology and Research. 2019. Vol. 3 (4). Pp. 181–192. DOI: 10.1007/s41783-019-00060-1
23. Григорьева Н.П., Галимуллин И.Н., Нугманов О.К., Лебедев Н.А., Лутфуллин Р.Р. Идентификация структуры травяной целлюлозы // Вестник Казанского технологического университета. 2014. Т. 17. № 14. С. 362–366.
24. Jingjing Xia, Yanmei Xiong, Shungeng Min, Jinyao Li. A review of recent infrared spectroscopy research for paper // Applied Spectroscopy Reviews. 2022. Vol. 58. Issue 10. Pp. 1–17. DOI: 10.1080/05704928.2022.2142939
25. Mehdi El Moustaqim, Abderrahmane El. Kaihal, Marouani M., Men-la-yakhaf S., Taibi M., Saloua Sebbahi et al. Thermal and thermomechanical analyses of lignin // Materials Science, Sustainable Chemistry and Pharmacy. 2018. Vol. 9. Pp. 63–68. DOI: 10.1016/J.SCP.2018.06.002
26. Деркачева О.Ю., Ишанходжаева М.М., Федоров А.В. Экспериментальное и теоретическое исследование ИК-спектров лигнинов // Вестник Санкт-Петербургского университета. Физика и химия. 2018. Т. 5 (63). Вып. 2. С. 78–85. DOI: 10.21638/11701/spbu04.2018.201
27. Aseeva R.M., Serkov B.B., Sivenkov A.B. Fire behavior and fire protection in timber buildings // Springer Series in Wood Science, Springer Dordrecht. 2014. Vol. IX. 290 p. DOI: 10.1007/978-94-007-7460-5

REFERENCES

1. Alén R. Manufacturing cellulosic fibres for making paper: a historical perspective. *Technological Transformation in the Global Pulp and Paper Industry 1800–2018* / Särkkä T., Gutiérrez-Poch M., Kuhlberg M. (eds.). Springer, Cham. 23. DOI: 10.1007/978-3-319-94962-82
2. Mullina E.R., Lygina E.G., Ershova O.V., Pinchukova K.V. Study of the influence of the chemical composition of cellulose on the physical and mechanical properties of paper. *Modern Science-Intensive Technologies*. 2015; 9:56-58. (rus).

3. Korolchenko D., Pizhurin A. Modelling operational production management in forestry house building enterprises. S. Jemiolo et al. (ed.). *MATEC Web of Conferences*. 2017; 117:00084. DOI: 10.1051/mateconf/201711700084
4. Korolchenko D.A., Pokrovskaya E.N., Portnov F.A., Kobelev A.A. Smoke-forming ability and toxicity of combustion products of wood materials at surface modification with organoelement compounds. *Pozharovzryvobezopasnost/ Fire and Explosion Safety* 2013; 10:40-45. (rus).
5. Proceedings of the 9th International Conference on Wood & Fire Safety 2020 / Osvaldova L.M., Markert F., Zelinka S.L. (ed.). *Springer Cham*. 2020; 480. DOI: 10.1007/978-3-030-41235-7
6. Korolchenko D.A., Korolchenko A.Ya. *Fire and explosion hazard of substances and materials and means of their extinguishing : Reference book in 2 parts. 2nd edition, revised and supplemented*. Moscow, OOO Izdatelstvo "Pozhnauka", 2004; 1:713. (rus).
7. Laptev A.B., Nikolaev E.V., Kolpachkov E.D. Thermodynamic characteristics of ageing of polymer composite materials under real operation conditions. *Aviation materials and technologies*. 2018; (52):80-88. DOI: 10.18577/2071-9140-2018-0-3-80-88 (rus).
8. Zaikov G.E. Aging, stabilisation and combustion of polymers and composites. About priorities in research. *Chemistry and Chemical Technology*. 2010; 53(12):143-145. (rus).
9. Zaikov G.E., Buchachenko A.L., Ivanov V.B. *Aging of polymers, polymer blends and polymer composites*. New York, Nova Science Publ., 2002; 1:258.
10. Emanuel N.M., Buchachenko A.L. *Chemical physics of aging of polymers*. Moscow, Nauka Publ., 1984; 342. (rus).
11. Zaikov G.E. *Destruction and Stabilisation of Polymers*. Moscow, Lomonosov M.V. MITHT Publishing House, 1993; 248. (rus).
12. Zaikov G.E. *Degradation and Stabilisation of Polymers*. New York, Nova Sci. Publ., 1999; 296.
13. Zaikov G.E. Why do polymers age? *Soros Educational Journal*. 2000; 6(12):48-55. (rus).
14. Bausch F., Owusu D.D., Graf J. et al. Shine a light on papyrus: monitoring the aging process. *Heritage Science*. 2022; 10(1). DOI: 10.1186/s40494-022-00687-5
15. Smirnova E.G. Effect of fibre composition on thermal degradation of paper before and after aging. *Chemistry of Vegetable Raw Materials*. 2011; 1:175-178. (rus).
16. Sivenkov A.B., Berlin A.A., Mukhamedgaliev B.A., Almenbayev M.M., Makishev Zh.K., Rakhmetulin B.Zh. Fire hazard and fire resistance of wooden structures. *Springer Nature Switzerland AG*. 2023; XVI:269. DOI: 10.1007/978-3-031-24074-4. DOI: 10.1007/978-3-031-24074-4.
17. Smirnova E.G., Zhuravleva N.M., Kizevetter D.V., Reznik A.S. Prospects for the use of chitin-glucan complex *Aspergillus Niger* in the composition of electrical insulating types of paper. *Chemistry of vegetable raw materials*. 2019; 3:315-323. (rus).
18. Zakharov I.V., Zakharova N.L., Kanarsky A.V., Kazakov Y.V., Popov A.V., Dulkan D.A. Increase of cardboard resistance to aging by impregnation with biomodified gluten. *Izvestiya St. Petersburg Forestry Academy*. 2018; 222:216-227. DOI: 10.21266/2079-4304.2018.222.216-227 (rus).
19. Smirnova E.G. Impact of aging on the structure of paper and its constituent fibers. *Forestry Journal*. 2010; 3:125-130. (rus).
20. Vyazovkin S., Nobuyoshi Koga, Christoph Schick. *Handbook of Thermal Analysis and Calorimetry Recent Advances, Techniques and Applications. 2nd Ed. Elsevier Science*. 2018; 800.
21. Printseva M.Yu., Cheshko I.D. Thermal analysis and infrared spectroscopy of gaseous thermal degradation products in the expert study of anticyped wood. *Fire Safety*. 2014; 3:96-101. (rus).
22. Mahdavi Nejad A. Thermal analysis of paper board packaging with phase change material: A numerical study. *Journal of Packaging Technology and Research*. 2019; 3:181-192. DOI: 10.1007/s41783-019-00060-1
23. Grigorieva N.P., Galimullin I.N., Nugmanov O.K., Lebedev N.A., Lutfullin R.R. Structure identification of grass cellulose. *Bulletin of Kazan Technological University*. 2014; 17(14):362-366. (rus).
24. Jingjing Xia, Yanmei Xiong, Shungeng Min, Jinyao Li. A review of recent infrared spectroscopy research for paper. *Applied Spectroscopy Reviews*. 2022; 58(10):1-17. DOI: 10.1080/05704928.2022.2142939
25. Mehdi El Moustaqim, Abderrahmane El Kaihal, Marouani M., Men-la-yakhaf S., Taibi M., Saloua Sebbahi et al. Thermal and thermomechanical analyses of lignin. *Materials Science, Sustainable Chemistry and Pharmacy*. 2018; 9:63-68. DOI: 10.1016/J.SCP.2018.06.002
26. Derkacheva O.Y., Ishankhodjaeva M.M., Fedorov A.V. Experimental and theoretical study of IR spectra of lignins. *Bulletin of St. Petersburg University. Physics and Chemistry*. 2018; 5(2):78-85. DOI: 10.21638/11701/spbu04.2018.201 (rus).
27. Aseeva R.M., Serkov B.B., Sivenkov A.B. Fire behaviour and fire protection in timber buildings. *Springer Series in Wood Science, Springer Dordrecht*. 2014; IX:290. DOI: 10.1007/978-94-007-7460-5

Поступила 20.10.2023, после доработки 27.11.2023;
принята к публикации 05.12.2023

Received October 20, 2023; Received in revised form November 27, 2023;

Accepted December 5, 2023

Информация об авторах

РУМЯНЦЕВА Алена Андреевна, аспирант, Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет, Россия, 129337, г. Москва, Ярославское шоссе, 26; ORCID: 0009-0009-8856-4276; e-mail: alenarum1996@gmail.com

ФЕДОТОВ Илья Олегович, адъюнкт, Академия Государственной противопожарной службы Министерства Российской Федерации по делам гражданской обороны, чрезвычайным ситуациям и ликвидации последствий стихийных бедствий, Россия, 129366, г. Москва, ул. Бориса Галушкина, 4; SPIN-код: 7865-2521; ORCID: 0000-0002-5076-3167; e-mail: ilafedotov367@gmail.com

СИВЕНКОВ Андрей Борисович, д-р техн. наук, профессор, Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет, Россия, 129337, г. Москва, Ярославское шоссе, 26; РИНЦ ID: 434522; ResearcherID: R-5518-2017; ORCID: 0000-0003-3821-8606; e-mail: sivenkov01@mail.ru

НАГАНОВСКИЙ Юрий Кузьмич, канд. техн. наук, старший научный сотрудник, Всероссийский ордена «Знак Почета» научно-исследовательский институт противопожарной обороны Министерства Российской Федерации по делам гражданской обороны, чрезвычайным ситуациям и ликвидации последствий стихийных бедствий, Россия, 143903, Московская обл., г. Балашиха, мкр. ВНИИПО, 12; РИНЦ ID: 43977865; Scopus AuthorID: 6506689489; ResearcherID: 166916; ORCID: 0000-0001-9739-9123; e-mail: reut11731@mail.ru

Вклад авторов:

Румянцева А.А. — проведение анализа работ в области изучения процесса старения бумаги; поиск образцов для исследования; участие в проведении испытаний и апробация полученных результатов; формирование выводов.

Федотов И.О. — поиск образцов для исследования; участие в проведении термогравиметрических испытаний и апробация полученных результатов; формирование выводов.

Сивенков А.Б. — научное руководство; концепция исследования; участие в испытаниях и апробация полученных результатов; формирование выводов.

Нагановский Ю.К. — организация проведения термогравиметрических испытаний и обработка полученных результатов; формирование выводов.

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Information about the authors

Alena A. RUMYANTSEVA, Postgraduate Student, Moscow State University of Civil Engineering (National Research University), Yaroslavl'skoe shosse, 26, Moscow, 129337, Russian Federation; ORCID: 0009-0009-8856-4276; e-mail: alenarum1996@gmail.com

Ilya O. FEDOTOV, Postgraduate Student, the State Fire Academy of the Ministry of Russian Federation for Civil Defense, Emergencies and Elimination on Consequences of Natural Disasters, Borisla Galushkina St., 4, Moscow, 129366, Russian Federation; SPIN-code: 7865-2521; ORCID: 0000-0002-5076-3167; e-mail: ilafedotov367@gmail.com

Andrey B. SIVENKOV, Dr. Sci. (Eng.), Professor, Moscow State University of Civil Engineering (National Research University), Yaroslavl'skoe shosse, 26, Moscow, 129337, Russian Federation; ID RSCI: 434522; ResearcherID: R-5518-2017; ORCID: 0000-0003-3821-8606; e-mail: sivenkov01@mail.ru

Yuriy K. NAGANOVSKIY, Cand. Sci. (Eng.), Senior Researcher, All-Russian Research Institute for Fire Protection of Ministry of Russian Federation for Civil Defense, Emergencies and Elimination of Consequences of Natural Disasters, VNIPO, 12, Balashikha, Moscow Region, 143903, Russian Federation; ID RSCI: 43977865; Scopus AuthorID: 6506689489; ResearcherID: 166916; ORCID: 0000-0001-9739-9123; e-mail: reut11731@mail.ru

Contribution of the authors:

Altna A. Rumyantseva — analysing works in the field of paper ageing process research; searching for samples for research; participation in tests and approbation of the obtained results; drawing conclusions.

Ilya O. Fedotov — search of samples for research; participation in thermogravimetric tests and approbation of the obtained results; formation of conclusions.

Andrey B. Sivenkov — scientific guidance; research concept; participation in tests and approbation of the obtained results; formation of conclusions.

Yuriy K. Naganovskiy — organisation of thermogravimetric tests and processing of the obtained results; drawing conclusions.

The authors declare that there is no conflict of interest.

ПОЖАРОВЗРЫВБЕЗОПАСНОСТЬ/FIRE AND EXPLOSION SAFETY. 2024. Т. 33. № 1. С. 51–59
POZHAROVZRYVOBEZOPASNOST/FIRE AND EXPLOSION SAFETY. 2024; 33(1):51-59

НАУЧНАЯ СТАТЬЯ/RESEARCH PAPER

УДК 614.841

<https://doi.org/10.22227/0869-7493.2024.33.01.51-59>

Исследование параметров токсичности продуктов горения мягких элементов мебели

Сергей Викторович Пузач¹✉, Наталия Ивановна Константинова²,
Руслан Гянджавиевич Акперов³, Александр Олегович Овчинников³

¹ Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет, г. Москва, Россия

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

³ Академия Государственной противопожарной службы Министерства Российской Федерации по делам гражданской обороны, чрезвычайным ситуациям и ликвидации последствий стихийных бедствий, г. Москва, Россия

АННОТАЦИЯ

Введение. Мягкая мебель занимает достаточно значительное по площади пространство помещений многих общественных зданий. При ее горении могут образовываться смеси токсичных газов, количественный и качественный состав которых неизвестен. Поэтому получение экспериментальных данных по токсичности мягкой мебели является актуальной задачей.

Цель. Экспериментальное определение воспламеняемости и параметров токсичности продуктов горения мягких элементов мебели, необходимых для расчета времени блокирования путей эвакуации в зданиях. Для ее достижения были проведены экспериментальные исследования образцов мягких элементов мебели на стандартных установках, а также на установке по определению пожарной опасности конденсированных веществ и материалов.

Методы исследования. Использовались стандартные методы определения воспламеняемости декоративных тканей (ГОСТ Р 50810–95), воспламеняемости элементов мягкой мебели (ГОСТ Р 53294–2009), показателя токсичности продуктов горения (ГОСТ 12.1.044.89, п. 4.20) и метод оценки концентраций токсичных газов на маломасштабной экспериментальной установке для определения пожарной опасности конденсированных веществ и материалов.

Результаты исследований и их обсуждение. Выполнено определение воспламеняемости материалов и композиций мягкой мебельной продукции, а также оценка токсичности газовой среды при их термическом разложении в маломасштабной экспериментальной установке, позволяющей измерять концентрации токсичных газов. Проведены экспериментальные исследования по изучению параметров токсичности наиболее опасных газов, образующихся при горении ряда образцов мягких элементов мебели. Выявлено, что при горении мягких элементов мебели выделяются в опасных для жизни и здоровья человека концентрациях такие высокотоксичные газы, как циановодород и монооксид углерода.

Выводы. Получены новые экспериментальные данные по удельной массовой скорости выгорания, а также численным значениям удельных коэффициентов образования монооксида углерода и циановодорода мягких элементов мебели, что позволит расширить существующую базу данных типовой пожарной нагрузки в помещениях зданий.

Ключевые слова: мягкая мебель; пожар; циановодород; монооксид углерода; парциальная плотность; критическая концентрация

Для цитирования: Пузач С.В., Константинова Н.И., Акперов Р.Г., Овчинников А.О. Исследование параметров токсичности продуктов горения мягких элементов мебели // Пожаровзрывобезопасность/Fire and Explosion Safety. 2024. Т. 33. № 1. С. 51–59. DOI: 10.22227/0869-7493.2024.33.01.51-59

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

Investigation of toxicity parameters of combustion products of upholstered furniture elements

Sergey V. Puzach¹✉, Nataliya I. Konstantinova², Ruslan G. Akperov³, Alexsandr O. Ovchinnikov³

¹ Moscow State University of Civil Engineering (National Research University), Moscow, Russian Federation

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

³ The State Fire Academy of the Ministry of Russian Federation for Civil Defense, Emergencies and Elimination on Consequences of Natural Disasters, Moscow, Russian Federation

ABSTRACT

Introduction. Upholstered furniture occupies quite a significant area of the premises of many public buildings. During its combustion, mixtures of toxic gases can be formed, the quantitative and qualitative composition of which is unknown. Therefore, obtaining experimental data on the toxicity of upholstered furniture is an urgent task.

Goals and objectives. Experimental determination of flammability and toxicity parameters of combustion products of upholstered furniture elements necessary for calculation of the time of blocking of evacuation routes in buildings.

To achieve this, experimental studies of specimens of upholstered furniture elements were carried out on standard installations, as well as on the installation for determining the fire hazard of condensed substances and materials.

Research methods. Standard methods for determining the flammability of decorative fabrics (GOST R 50810–95), the flammability of upholstered furniture elements (GOST R 53294–2009), the toxicity index of combustion products (GOST 12.1.044.89, paragraph 4.20) and the method for assessing toxic gas concentrations at a small-scale experimental installation to determine the fire hazard of condensed substances and materials were used.

Research results and their discussion. The determination of flammability of materials and compositions of upholstered furniture products, as well as the assessment of the toxicity of the gaseous atmosphere during their thermal decomposition in a small-scale experimental installation allowing the measurement of concentrations of toxic gases, were performed. Experimental studies were carried out to study the toxicity parameters of the most dangerous gases formed during the combustion of a number of specimens of upholstered furniture elements. It was revealed that during the combustion of upholstered furniture elements, such highly toxic gases as hydrogen cyanide and carbon monoxide are emitted in concentrations dangerous to human life and health.

Conclusions. New experimental data on specific mass rate of burnout velocity, as well as numerical values of specific coefficients of carbon monoxide and hydrogen cyanide formation of upholstered furniture elements have been obtained, which will allow to expand the existing database of typical fire load in building premises.

Keywords: upholstered furniture; fire; hydrogen cyanide; carbon monoxide; partial density; critical concentration

For citation: Puzach S.V., Konstantinova N.I., Akperov R.G., Ovchinnikov A.O. Investigation of toxicity parameters of combustion products of upholstered furniture elements. *Pozharovzryvobezopasnost/Fire and Explosion Safety*. 2024; 33(1):51-59. DOI: 10.22227/0869-7493.2024.33.01.51-59 (rus).

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

Введение

Мягкая мебель занимает значительное место в жизни человека из достаточно обширного спектра различных предметов и вещей, которые он использует в повседневной жизни. Поэтому сложно представить, как современный человек может обойтись без данного элемента комфорта, ведь почти во всех зданиях и сооружениях различных классов функциональной пожарной опасности присутствует мягкая мебель.

Именно здесь кроется самая большая опасность мягкой мебельной продукции, так как горение легковоспламеняемых обивочных и набивочных материалов при возникновении пожара распространяется стремительно на соседние, рядом стоящие предметы, и в совокупности выделяются токсичные газообразные вещества, которые могут оказаться смертельными для человека.

Очевидно, что развитие различных методов математического моделирования образования токсичных газов продукцией данной области необходимо для разработки обоснованных рекомендаций по обеспечению безопасной эвакуации людей при пожаре из различного типа зданий.

Целью настоящей работы является экспериментальное определение воспламеняемости и параметров токсичности продуктов горения мягких элементов мебели, необходимых для расчета времени блокирования путей эвакуации в зданиях.

Для ее достижения были проведены экспериментальные исследования образцов мягких элементов мебели на стандартных установках, а также на установке по определению пожарной опасности конденсированных веществ и материалов [1, 2].

Методы исследования

Для определения показателей пожарной опасности мягких элементов мебели использовалось следующее экспериментальное оборудование:

- стандартный прибор для определения воспламеняемости тканей по ГОСТ Р 50810–95¹;
- стандартная установка для определения воспламеняемости мягких элементов мебели по ГОСТ Р 53294–2009 (п. 5)²;
- стандартная установка для экспериментального определения показателя токсичности продуктов горения твердых веществ и материалов по ГОСТ 12.1.044–89 п. 4.20³;
- установка для определения пожарной опасности конденсированных веществ и материалов [1, 2].

¹ ГОСТ Р 50810–95. Пожарная безопасность текстильных материалов. Ткани декоративные. Метод испытания на воспламеняемость и классификация.

² ГОСТ Р 53294–2009. Материалы текстильные. Постельные принадлежности. Мягкие элементы мебели. Шторы. Занавеси. Методы испытаний на воспламеняемость.

³ ГОСТ 12.1.044–89 (ИСО 4589–84). Система стандартов безопасности труда (ССБТ). Пожаровзрывоопасность веществ и материалов. Номенклатура показателей и методы их определения.

Результаты исследований на стандартной установке и их обсуждение

Текстиль в интерьере занимает одно из самых доступных и эффектных способов оформления помещений, благодаря которому создается гармоничное пространство, уютная атмосфера, и, наряду с этим, присутствует практическое его использование.

Мягкая мебель является наиболее функциональным компонентом пространства помещений многих общественных зданий: гостиниц, зрелищных заведений, лечебных учреждений и т.д., к которым предъявляются обязательные требования пожарной безопасности, поэтому вопросам исследования эффективной огнезащиты материалов элементов мягкой мебели, разработки методологии испытаний по оценке параметров пожарной опасности уделяется внимание многими учеными и специалистами⁴ [3–7].

Согласно статье 1 Федерального закона № 69-ФЗ от 21.12.1994⁵, пожар является неконтролируемым горением, причиняющим материальный ущерб, вред жизни и здоровью граждан, интересам общества и государства.

Основные причины возгорания мягкой мебели определены. В 90–96 % случаев причиной возникновения пожаров является субъективный фактор — поведение и действия человека, что обуславливает возникновение загорания различной природы в виде очага горения (непотушенная сигарета, спичка) или высокотемпературных нагретых поверхностей (аварийный режим электроприборов).

Пожарная безопасность мягкой мебели в отечественной нормативной практике регламентируется ТР ТС 025/2012⁶. И необходимый уровень пожарной безопасности текстильных и кожевенных материалов, применяемых в качестве обивочных элементов при изготовлении изделий мягкой мебели для сидения и лежания, достигается требованиями ограничения применения легковоспламеняемых и относящихся к чрезвычайно опасным по показателю токсичности продуктов горения материалов³ (п. 4.20).

Аналогичные требования к пожарной безопасности сидений зальных помещений, зрелищных объектов закрытого типа существуют и изложены в СП 4.13130.2013⁷ (п. 5.4.13).

Следует отметить, что требования пожаробезопасного использования текстильных материалов, в том числе сидений и диванов, на различных видах транспорта также регламентируются показателем токсичности продуктов горения.

За рубежом в ряде стран при установлении возможности использования мягкой мебели в общественных местах предусмотрены стендовые и крупномасштабные исследования для моделирования возможных сценариев пожара по причине возгорания от мало-мощных источников загорания обивочных материалов, наполнителей, фурнитуры, входящих в различные конструкции и размеры изделий для выявления, наряду с другими параметрами (воспламеняемость, дымообразующая способность, скорость тепловыделения), опасных концентраций выделения целого ряда токсичных летучих продуктов горения⁸ [8, 9].

Например, в США применяется крупномасштабный метод тестирования текстильных материалов и изделий⁹, по результатам испытаний (в том числе оценки выхода основных газообразных токсикантов) регламентируется пожаробезопасное применение мягкой мебели в общественных местах (лечебных учреждениях, гостиничных комплексах и др.).

В зарубежных исследованиях пожарной опасности изделий мягкой мебели, как правило, применяют ее реальные размеры и используют специальное помещение с измерительным оборудованием, которое фиксирует комплекс параметров, таких как выделение оксида углерода, общую задымленность, потерю массы, повышение температуры окружающей среды. На основе проведенных исследований разрабатываются подходы по созданию мебельных композиций пониженной пожарной опасности, учитывающие возможный уровень выделения токсично опасных продуктов горения¹⁰ [10, 11].

Для оценки токсичности продуктов термического разложения в международной нормативной документации, регламентирующей пожаробезопасное применение текстильных, кожевенных материалов и изделий в различных областях применения — транспорте, общественных зданиях и сооружениях, используется метод ISO 5659-2¹¹, основанный на исследовании результатов количественного анализа достаточно широкого спектра газов и характеризующий общее

⁴ Shivani Mehta. Upholstered furniture full scale chair tests — Open flame ignition results and analysis. Memorandum to Dale R. Ray, CPSC, May 9, 2012. URL: 3fs-public/openflame.pdf

⁵ О пожарной безопасности : Федеральный закон от 21.12.1994 № 69-ФЗ.

⁶ Технический регламент таможенного союза. ТР ТС 025/2012. О безопасности мебельной продукции.

⁷ СП 4.13130.2013. Системы противопожарной защиты. Ограничение распространения пожара на объектах защиты. Требования к объемно-планировочным и конструктивным решениям.

⁸ Andrew Lock. Memoranda on Full-Scale Upholstered Furniture Testing, 2014–2015, 2016. 133 p. URL: https://www.cpsc.gov/s3fs-public/FY14_Chair_Study_Memos.pdf.

⁹ TB 133 “Flammability test for seating furniture used in public occupancies repealed”.

¹⁰ Kim Y.S., Li Y-C., Pitts W.M., Werrel M., Davis R.D. Rapid growing clay coatings to reduce the fire threat of furniture. ACS Applied Materials & Interfaces. 2014. No. 6. Pp. 2416–2152. DOI: 10.1021/am405259n

¹¹ ISO 5659-2:2017. Пластмассы. Образование дыма. Часть 2. Определение оптической плотности при испытании в одной камере.

интегральное токсикологическое действие продуктов термического разложения и процесса горения.

Применяемая национальная методология определения токсичности материалов согласно ГОСТ 12.1.044 (п. 4.20)³ предусматривает в качестве критерия оценки только показатель токсичности продуктов горения. Режим пламенного горения в методе обеспечивается при температуре испытания 750 °С и плотности падающего теплового потока 65 (кВт/м²), а при анализе продуктов горения определяют количественный выход оксида углерода (СО) диоксида углерода (СО₂).

Максимальный выход СО как основного токсиканта, минимальное время разложения материала и тепловой поток, при котором происходит термическое разложение, являются решающими факторами для отнесения материала к наиболее опасным.

Однако метод не дает возможности получения данных для моделирования динамики развития пожара с учетом концентраций наиболее опасных токсичных летучих продуктов горения материалов для жизни и здоровья человека.

В данной работе проводились комплексные экспериментальные исследования воспламеняемости и токсичности продуктов горения материалов и их

композиционных сочетаний, применяемых для изготовления мягких элементов мебели, с целью сравнительной оценки выхода и концентрации наиболее токсичных продуктов горения.

В работе представлены исследования воспламеняемости и токсичности продуктов термического разложения образцов композиционных сочетаний мягких элементов мебели, различных видов применяемых на практике обивочных текстильных материалов, наполнителя и прокладочного материала. В качестве обивочных материалов были выбраны наиболее широко используемые ткани из полиэфира (ПЭ), в том числе огнезащищенные (ПЭ Тревира CS), различной плотности и текстильного плетения (шенилл, жаккард, рогожка), вспененный пенополиуретановый (ППУ) наполнитель и огнезащищенный нетканый прокладочный материал на основе термостойких волокон.

Параметры токсичности, данные по количеству выделившихся оксида и диоксида углерода при термоокислительном разложении и горении по ГОСТ 12.1.044–89 (п. 4.20)³, а также классификация по воспламеняемости по ГОСТ Р 50810–95¹ материалов различного состава приведены в таблице.

Из данных таблицы следует, что в процессе термического разложения огнезащищенных ТВ ПЭ тканей

Количество выделившихся оксида и диоксида углерода при горении обивочных тканей и наполнителей различного состава
Amount of carbon monoxide and dioxide released during combustion of upholstery fabrics and fillers of different compositions

Состав ткани (материала) Fabric composition (material)	Поверхностная плотность ткани, г/м ² Fabric surface density, g/m ²	$T_{разл}, ^\circ\text{C}$ $T_d, ^\circ\text{C}$	$\tau_{разл}, \text{мин}$ τ_d, min	Потеря массы, % Weight loss, %	Выход СО, мг/с CO output, mg/s	Выход СО ₂ , мг/с CO ₂ output, mg/s	Показатель токсичности HCl ₅₀ Toxicity index HCl ₅₀	Классификация по воспламеняемости Flammability classification
Ткань (жаккард) ПЭ — 100 % Fabric (jacquard) PE — 100 %	400	650	14	> 99	132	1341	36	ЛВ* HF*
Ткань (шенилл) ПЭ — 100 % (Trevira CS) Fabric (chenille) PE — 100 % (Trevira CS)	550	650	14	96	152	1313	38	ТВ** FR**
Ткань (рогожка) ПЭ — 100 % (Trevira CS) Fabric (gunny) PE — 100 % (Trevira CS)	260	650	12	97	143	1438	35	ТВ FR
ППУ PPU	50 г/м ³ 50 g/m ³	650	12	98	174	1054	30	ЛВ HF
Нетканый материал на основе термостойких волокон Non-woven fabric based on heat-resistant fibres	150	600	7	93	105	1280	47	ТВ FR

* ЛВ — легковоспламеняемые, согласно ГОСТ Р 50810¹.

** ТВ — трудновоспламеняемые, согласно ГОСТ Р 50810¹.

* HF — highly flammable according to GOST R 50810¹.

** FR — flame-resistant according to GOST R 50810¹.

различной плотности и структуры (шенилл, рогожка, жаккард) практически не происходит изменения количества выделяющихся монооксида и диоксида углерода по сравнению с исходной ЛВ ПЭ тканью, о чем также свидетельствуют близкие по численному значению показатели токсичности ($HC1_{50}$), находящиеся в диапазоне (35–38) г/м³. У образцов нетканого материала из термостойких волокон количество выделившихся оксида и диоксида углерода несколько ниже по сравнению с образцами обивочных тканей и показатель токсичности ($HC1_{50}$) составляет 47 г/м³. Самый высокий уровень выделившихся оксида и диоксида углерода из исследуемых образцов материалов относится к вспененному эластичному полиуретану (ППУ).

Следует отметить, что используемый стандартный метод не предусматривает оценку токсичности продуктов горения многокомпонентных композиций (например, мягкие элементы мебели), а дает возможность провести лишь сравнительное определение значений показателя токсичности отдельных материалов. Кроме того, количественная оценка выхода только газообразных оксида и диоксида углерода при термическом разложении образца материала не может объективно оценить опасность общего токсикологического воздействия, так как не учитывает выделение ряда присутствующих опасных летучих химических соединений.

При горении многокомпонентных композиций материалов выделяется широкий спектр токсичных газов [12–15], токсическое действие которых на организм человека изучено достаточно полно [16–18]. Поэтому для исследования параметров токсичности мягких элементов мебели необходимо провести испытания в экспериментальной установке, позволяющей определить качественный и количественный состав продуктов горения.

Результаты исследований на установке для определения пожарной опасности конденсированных веществ и их обсуждение

С целью сравнительной оценки параметров токсичности продуктов термического разложения образцов, представляющих собой различные по устойчивости к воспламенению композиции элементов мягкой мебели, были проведены исследования на экспериментальной установке для определения пожарной опасности конденсированных веществ [1, 2].

Исследовались образцы мягких элементов мебели различной воспламеняемости с огнезащитными обивочными материалами следующего композиционного сочетания:

- образец № 1 (ТВ по ГОСТ Р 53294)²: ткань (шенилл) ПЭ — 100 % (Trevira CS), термовойлок, ППУ;

- образец № 2 (ЛВ по ГОСТ Р 53294)²: ткань (рогожка) ПЭ — 100 % (Trevira CS), ППУ.

Испытания проводились в режиме пламенного горения при плотности теплового потока, падающего на поверхность образца от нагревательного излучательного элемента установки 35 кВт/м².

Оценивалась динамика изменения массовой скорости выгорания, как одной из важнейших характеристик, значительно влияющей на процесс и исход математического моделирования пожара.

Зависимости удельной массовой скорости выгорания от времени проведения экспериментов исследованных образцов мягких элементов мебели представлены на рис. 1.

Из рис. 1 следует, что вышеуказанная зависимость носит нелинейный характер и имеет некоторые изменения в ходе проведения эксперимента, происходящие под влиянием ряда внутренних и внешних факторов.

При этом удельная массовая скорость выгорания образца № 1 мягкого элемента мебели существенно больше соответствующей величины для образца № 2 (пиковое значение вышеуказанного параметра больше в 4,3 раза).

Измерения концентраций токсичных газов показали, что при горении испытываемых образцов выделяются высокотоксичные газы — монооксид углерода и циановодород.

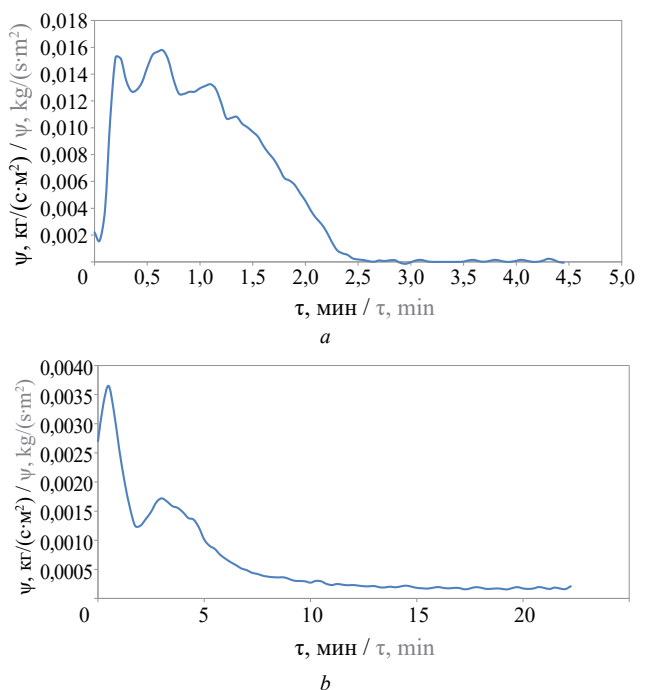


Рис. 1. Динамика изменения массовой скорости выгорания в ходе проведения эксперимента: а — образец № 1; б — образец № 2

Fig. 1. Dynamics of mass burnout velocity change during the experiment: a — Specimen No. 1; b — Specimen No. 2

Зависимости парциальных плотностей вышеуказанных газов от времени испытаний представлены на рис. 2 в случае горения образца № 1 и на рис. 3 — для образца № 2, где $\rho_{CO,кр}$ и $\rho_{HCN,кр}$ — критические значения газов¹⁰.

Зависимости удельных коэффициентов образования токсичных газов от времени испытаний представлены на рис. 4 в случае горения образца № 1 и на рис. 5 — для образца № 2.

Из рис. 2 и 3 следует, что парциальные плотности монооксида углерода и циановодорода достигают своих критических значений за время испытаний.

Из рис. 4 и 5 видно:

- удельный коэффициент образования монооксида углерода в случае образца № 2 существенно больше соответствующей величины для образца № 1 (пиковое значение вышеуказанного параметра больше в 2 раза);
- удельный коэффициент образования циановодорода в случае образца № 2 существенно больше соответствующей величины для образца № 1 (пиковое значение вышеуказанного параметра больше в 2,6 раза).

Таким образом, в результате проведенных исследований удалось установить параметры образования наиболее опасных токсичных продуктов термического разложения (монооксида углерода и циановодорода) образцов композиций мягкой мебели различного уровня воспламеняемости. Наличие

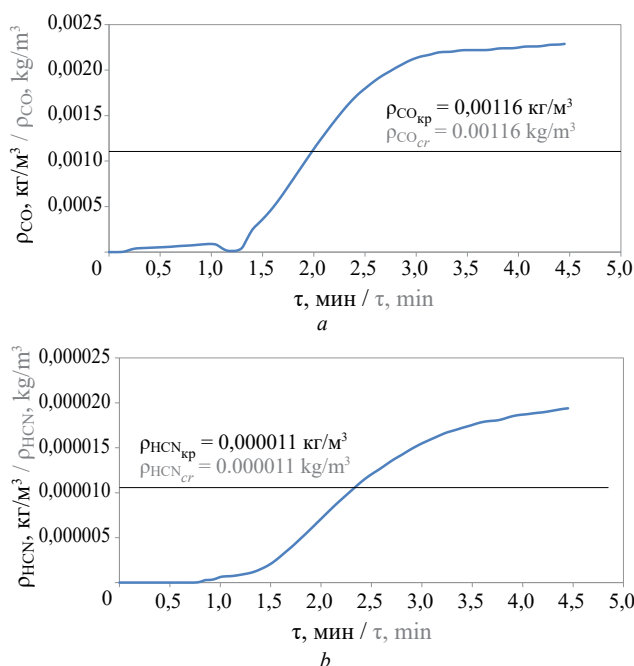


Рис. 2. Зависимости парциальной плотности монооксида углерода (a) и циановодорода (b) от времени проведения эксперимента в случае горения образца № 1

Fig. 2. Dependence of partial density of carbon monoxide (a) and hydrogen cyanide (b) on the experiment time in case of combustion of specimen No. 1

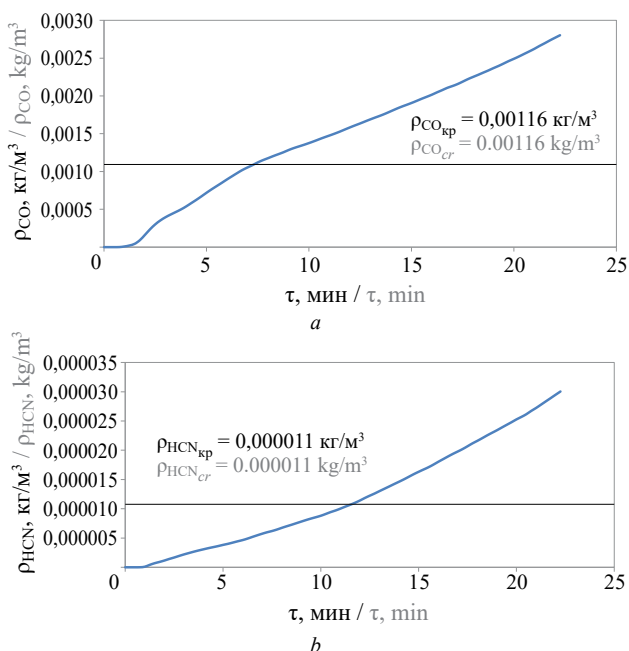


Рис. 3. Зависимости парциальной плотности монооксида углерода (a) и циановодорода (b) от времени проведения эксперимента в случае горения образца № 2

Fig. 3. Dependence of partial density of carbon monoxide (a) and hydrogen cyanide (b) on experiment time in case of combustion of specimen No. 2

прокладочного материала между обивочной тканью и горючим наполнителем не только повышает устойчивость к воспламенению (образец № 1 относится к трудновоспламеняемым по ГОСТ Р 53294–2009)², но и в значительной степени снижает удельную массовую скорость выгорания и численные значения удельных коэффициентов образования монооксида

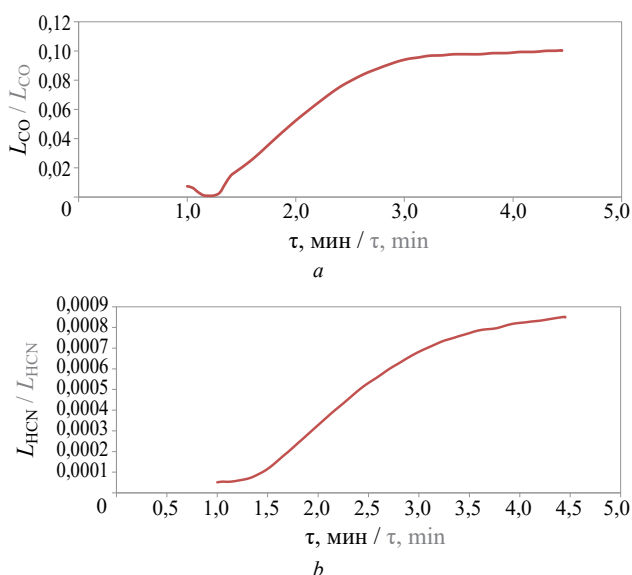


Рис. 4. Зависимости удельных коэффициентов образования монооксида углерода (a) и циановодорода (b) от времени проведения эксперимента в случае горения образца № 1

Fig. 4. Dependence of specific coefficients of carbon monoxide formation (a) and hydrogen cyanide (b) on the experiment time in case of combustion of specimen No. 1

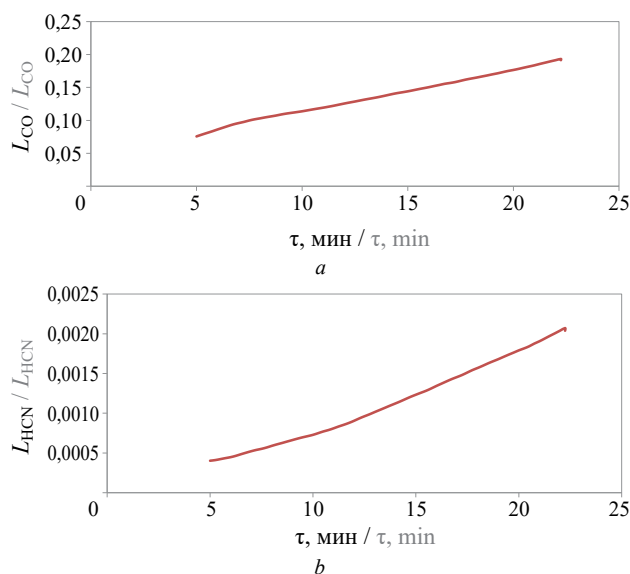


Рис. 5. Зависимости удельных коэффициентов образования монооксида углерода (а) и циановодорода (б) от времени проведения эксперимента в случае горения образца № 2
Fig. 5. Dependence of specific coefficients of carbon monoxide formation (a) and hydrogen cyanide (b) on the experiment time in case of combustion of specimen No. 2

углерода и циановодорода, как параметров наиболее опасных токсикантов. Полученные новые экспериментальные данные параметров термического разложения элементов мягкой мебели позволят повысить надежность расчета времени блокирования путей эвакуации при воздействии на человека основных

токсикантов, необходимого для обоснования объемно-планировочных решений зданий.

Выводы

Результаты проведенных экспериментальных исследований позволили сделать следующее заключение.

По результатам измерения концентраций токсичных газов установлено, что при горении образцов, представляющих собой мягкие элементы мебели из ПЭ обивочной ткани, прокладочного материала и наполнителя ППУ, выделяются высокотоксичные газы — монооксид углерода и циановодород.

Получены новые экспериментальные данные по удельной массовой скорости выгорания и численным значениям удельных коэффициентов образования монооксида углерода и циановодорода мягких элементов мебели, что позволит расширить существующую базу данных типовой пожарной нагрузки.

Использование прокладочного материала между горючим ППУ наполнителем и обивочным материалом в элементах мягкой мебели приводит к возможности не только получения трудновоспламеняемой композиции, но и изменению параметров образования токсичных продуктов горения, что позволит разработать обоснованные рекомендации для обеспечения безопасной эвакуации людей при пожаре на объектах с массовым пребыванием людей.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Пузач С.В., Доан В.М., Нгуен Т.Д., Сулейкин Е.В., Акперов Р.Г. Образование, распространение и воздействие на человека токсичных продуктов горения при пожаре в помещении. М. : Академия ГПС МЧС России, 2017. 130 с.
2. Пузач С.В., Болдрушкиев О.Б. Определение удельного коэффициента образования и критической парциальной плотности циановодорода и монооксида углерода при пожаре в помещении // Пожаровзрывобезопасность/Fire and Explosion Safety. 2019. Т. 28. № 5. С. 19–26. DOI: 10.18322/PVB.2019.28.05.19-26
3. Константинова Н.И., Зубань А.В., Булгакова А.А. Совершенствование методологического подхода к оценке пожарной опасности матрасов // Пожаровзрывобезопасность/Fire and Explosion Safety. 2022. Т. 31. № 2. С. 22–32. DOI: 10.22227/0869-7493.2022.31.02.22-32
4. Konstantinova N.I., Erofeev O.O. Development of materials for upholstered furniture elements of reduced fire hazard // Fibre Chemistry. 2022. Vol. 54. Pp. 258–262. DOI: 10.1007/s10692-023-10389-8
5. Thomas T., Babich M.A. CPSC staff exposure and risk assessment of flame retardant chemicals in residential upholstered furniture // U.S. Consumer Product Safety Commission. 2015. P. 109. DOI: 10.13140/RG.2.1.3291.6646
6. Storesund K., Steen-Hansen A., Bergstrand A. Fire safe upholstered furniture Alternative strategies to the use of chemical flame retardants // Report. 2015. No. A15 20124: 2. 48 p. DOI: 10.13140/RG.2.2.15431.70564
7. Пузач С.В., Константинова Н.И., Акперов Р.Г., Овчинников А.О. Пожарная опасность элементов мягкой мебели // Ройтмановские чтения : сб. мат. XI науч.-практ. конф., под ред. Д.А. Самошина. М. : Академия Государственной противопожарной службы Министерства Российской Федерации по делам гражданской обороны, чрезвычайным ситуациям и ликвидации последствий стихийных бедствий, 2023. С. 70–74.
8. Fabian T.Z., Gandhi P.D. Upholstered furniture flammability: Full-scale furniture and flashover experiments // Conference: Fire & Materials. 2013. Pp. 1–11.
9. Zammarano M., Hoehler M.S., Shields J.R., Thompson A.L., Kim I., Leventon I.T. et al. Bundy full-scale experiments to demonstrate flammability risk of residential upholstered furniture and mitigation using barrier fabric. National Institute of Standards and Technology, 2020. DOI: 10.6028/NIST.TN.2129
10. Nasare S., Pitts W., Matko S., Davis R.D. Evaluating smoldering behavior of barrier fabrics // Journal of Fire Sciences. 2014. Vol. 32. Issue 6. Pp. 539–562. DOI: 10.1177/0734904114543450

11. Davis A., Ryan P.B., Cohen J.A., Harris D., Black M. Chemical exposures from upholstered furniture with various flame retardant technologies // *Indoor air*. 2021. Vol. 31. Issue 5. Pp. 1473–1483. DOI: 10.1111/ina.12805
12. Пузач С.В., Бачурин Д.В., Акперов Р.Г., Болдрушкиев О.Б., Балаев А.А. Образование токсичных газов при горении мягких игрушек в многофункциональных торгово-развлекательных комплексах // *Пожаровзрывобезопасность/Fire and Explosion Safety*. 2023. Т. 32. № 1. С. 41–50. DOI: 10.22227/0869-7493.2023.32.01.41-50
13. Пузач С.В., Болдрушкиев О.Б., Акперов Р.Г. О необходимости учета совместного воздействия токсичных продуктов горения при определении времени блокирования путей эвакуации // *Ройтмановские чтения : сб. мат. 10-й науч.-практ. конф. (г. Москва, 26 мая 2022 года)*. М., 2022. С. 96–99.
14. Jakobsen J., Babigumira R., Danielsen M., Grimsrud T.K., Olsen R., Rosting C. et al. Work conditions and practices in Norwegian fire departments from 1950 until today: a survey on factors potentially influencing carcinogen exposure // *Safety and Health at Work*, 2020. Vol. 11. Issue 4. Pp. 509–516. DOI: 10.1016/j.shaw.2020.07.004
15. Wang S., Huang D., Guo C., Yuan Q., Chen Y., Lin P., Duan P. Bottom fire behaviour of thermally thick natural rubber latex foam // *E-Polymers*. 2019. Vol. 19. Issue 1. Pp. 9–14. DOI: 10.1515/epoly-2019-0002
16. Pauluhn J. Phosgene inhalation toxicity: Update on mechanisms and mechanism-based treatment strategies // *Toxicology*. 2021. Vol. 450. P. 152682. DOI: 10.1016/j.tox.2021.152682
17. Kaczorek-Chrobak K., Fangrat J. PVC-based copper electric wires under various fire conditions: toxicity of fire effluents // *Materials*. 2020. Vol. 13. Issue 5. P. 1111. DOI: 10.3390/ma13051111
18. Pauluhn J. Acute inhalation toxicity of carbon monoxide and hydrogen cyanide revisited: Comparison of models to disentangle the concentration × time conundrum of lethality and incapacitation // *Regulatory Toxicology and Pharmacology*. 2016. Vol. 80. Pp. 173–182. DOI: 10.1016/j.yrtph.2016.06.017

REFERENCES

1. Puzach S.V., Doan V.M., Nguen T.D., Sulejkin E.V., Akperov R.G. *Formation, distribution and human exposure to toxic combustion products during a fire in a room*. Moscow, State Fire Academy of Emercom of Russia Publ., 2017; 130. (rus).
2. Puzach S.V., Boldrushkiev O.B. Determination of the specific coefficient of formation and critical partial density of hydrogen cyanide and carbon monoxide during a fire in a room. *Pozharovzryvobezopasnost'/Fire and explosion safety*. 2019; 28(5):19-26. DOI: 10.18322/PVB.2019.28.05.19-26 (rus).
3. Konstantinova N.I., Zuban A.V., Bulgakova A.A. Improving the methodological approach to assessing the fire hazard of mattresses. *Pozharovzryvobezopasnost'/Fire and Explosion Safety*. 2022; 31(2):22-32. DOI: 10.22227/0869-7493.2022.31.02.22-32 (rus).
4. Konstantinova N.I., Erofeev O.O. Development of materials for upholstered furniture elements of reduced fire hazard. *Fibre Chemistry*. 2022; 54:258-262. DOI: 10.1007/s10692-023-10389-8
5. Thomas T., Babich M.A. CPSC staff exposure and risk assessment of flame retardant chemicals in residential upholstered furniture. *U.S. Consumer Product Safety Commission*. 2015; 109. DOI: 10.13140/RG.2.1.3291.6646
6. Storesund K., Steen-Hansen A., Bergstrand A. Fire safe upholstered furniture Alternative strategies to the use of chemical flame retardants. *REPORT*. 2015; A15 20124(2):48. DOI: 10.13140/RG.2.2.15431.70564
7. Puzach S.V., Konstantinova N.I., Akperov R.G., Ovchinnikov A.O. Fire hazard of upholstered furniture elements. *Roitman readings : collection of materials of the XI scientific and practical conference*. D.A. Samoshin (Ed.). Moscow, 2023; 70-74.
8. Fabian T.Z., Gandhi P.D. Upholstered furniture flammability: Full-scale furniture and flashover experiments. *Conference: Fire & Materials*. 2013; 1-11.
9. Zammarrano M., Hoehler M.S., Shields J.R., Thompson A.L., Kim I., Leventon I.T. et al. *Bundy Full-Scale Experiments to Demonstrate Flammability Risk of Residential Upholstered Furniture and Mitigation Using Barrier Fabric*. National Institute of Standards and Technology, 2020. DOI: 10.1177/0734904114543450
10. Nasare S., Pitts W., Matko S., Davis R.D. Evaluating smoldering behavior of barrier fabrics. *Journal of Fire Sciences*. 2014; 32(6):539-562. DOI: 10.1177/0734904114543450
11. Davis A., Ryan P.B., Cohen J.A., Harris D., Black M. Chemical exposures from upholstered furniture with various flame retardant technologies. *Indoor air*. 2021; 31(5):1473-1483. DOI: 10.1111/ina.12805
12. Puzach S.V., Bachurin D.V., Akperov R.G., Boldrushkiev O.B., Balaev A.A. Generation of toxic gases during combustion of stuffed toys in multifunction shopping malls. *Pozharovzryvobezopasnost'/Fire and Explosion Safety*. 2023; 32(1):41-50. DOI: 10.22227/0869-7493.2023.32.01.41-50 (rus).
13. Puzach S.V., Boldrushkiev O.B., Akperov R.G. The need to take into account the combined effects of harmful combustion products when determining the time of blocking escape routes. *Roitman readings : collection of materials from the 10th scientific and practical conference (Moscow, May 26, 2022)*. 2022; 96-99. (rus).
14. Jakobsen J., Babigumira R., Danielsen M., Grimsrud T.K., Olsen R., Rosting C. et al. Work conditions and practices in Norwegian fire departments from 1950 until today: a survey on factors potentially influencing carcinogen exposure. *Safety and Health at Work*. 2020; 11(4):509-516. DOI: 10.1016/j.shaw.2020.07.004
15. Wang S., Huang D., Guo C., Yuan Q., Chen Y., Lin P., Duan P. Bottom fire behaviour of thermally thick natural rubber latex foam. *E-Polymers*. 2019; 19(1):9-14. DOI: 10.1515/epoly-2019-0002

16. Pauluhn J. Phosgene inhalation toxicity: Update on mechanisms and mechanism-based treatment strategies. *Toxicology*. 2021; 450:152682. DOI: 10.1016/j.tox.2021.152682
17. Kaczorek-Chrobak K., Fangrat J. PVC-based copper electric wires under various fire conditions: toxicity of fire effluents. *Materials*. 2020; 13(5):1111. DOI: 10.3390/ma13051111
18. Pauluhn J. Acute inhalation toxicity of carbon monoxide and hydrogen cyanide revisited: Comparison of models to disentangle the concentration $\times$ time conundrum of lethality and incapacitation. *Regulatory Toxicology and Pharmacology*. 2016; 80:173-182. DOI: 10.1016/j.yrtph.2016.06.017

Поступила 26.10.2023, после доработки 28.12.2023;

принята к публикации 09.01.2024

Received October 26, 2023; Received in revised form December 28, 2023;

Accepted January 9, 2024

Информация об авторах

ПУЗАЧ Сергей Викторович, д-р техн. наук, профессор, заслуженный деятель науки РФ, профессор кафедры комплексной безопасности в строительстве, Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет, Россия, 129337, г. Москва, Ярославское шоссе, 26; Scopus AuthorID: 7003537835; ResearcherID: U-2907-2019; ORCID: 0000-0001-7234-1339; e-mail: puzachsv@mail.ru

КОНСТАНТИНОВА Наталия Ивановна, д-р техн. наук, профессор, главный научный сотрудник, Всероссийский ордена «Знак Почета» научно-исследовательский институт противопожарной обороны Министерства Российской Федерации по делам гражданской обороны, чрезвычайным ситуациям и ликвидации последствий стихийных бедствий, Россия, 143903, Московская обл., г. Балашиха, мкр. ВНИИПО, 12; РИНЦ ID: 774306; ORCID: 0000-0003-0778-0698; e-mail: konstantinova_n@inbox.ru

АКПЕРОВ Руслан Гянджавиевич, канд. техн. наук, доцент кафедры инженерной теплофизики и гидравлики, Академия Государственной противопожарной службы Министерства Российской Федерации по делам гражданской обороны, чрезвычайным ситуациям и ликвидации последствий стихийных бедствий, Россия, 129366, г. Москва, ул. Бориса Галушкина, 4; ORCID: 0000-0002-2524-8710; e-mail: akperov01@mail.ru

ОВЧИННИКОВ Александр Олегович, магистрант, Академия Государственной противопожарной службы Министерства Российской Федерации по делам гражданской обороны, чрезвычайным ситуациям и ликвидации последствий стихийных бедствий, Россия, 129366, г. Москва, ул. Бориса Галушкина, 4; ORCID: 0009-0004-4570-878X; e-mail: sasha_trewq07@mail.ru

Вклад авторов:

Пузач С.В. — научное руководство; концепция исследования; развитие методологии; написание исходного текста; итоговые выводы.

Константинова Н.И. — концепция исследования; развитие методологии; написание исходного текста; итоговые выводы.

Акперов Р.Г. — концепция исследования; развитие методологии; доработка текста; итоговые выводы.

Овчинников А.О. — развитие методологии; доработка текста; итоговые выводы.

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Information about the authors

Sergey V. PUZACH, Dr. Sci. (Eng.), Professor, the Honoured Scientist of the Russian Federation, Professor of Department of Integrated Safety in Construction, Moscow State University of Civil Engineering (National Research University), Yaroslavlshoshe, 26, Moscow, 129337, Russian Federation; Scopus AuthorID: 7003537835; ResearcherID: U-2907-2019; ORCID: 0000-0001-7234-1339; e-mail: puzachsv@mail.ru

Nataliya I. KONSTANTINOVA, Dr. Sci. (Eng.), Professor, Chief Researcher, All-Russian Research Institute for Fire Protection of Ministry of Russian Federation for Civil Defense, Emergencies and Elimination of Consequences of Natural Disasters, VNIPO, 12, Balashikha, Moscow Region, 143903, Russian Federation; ID RSCI: 774306; ORCID: 0000-0003-0778-0698; e-mail: konstantinova_n@inbox.ru

Ruslan G. AKPEROV, Cand. Sci. (Eng.), Assistant Professor of Thermal Physics and Hydraulic Department, the State Fire Academy of the Ministry of Russian Federation for Civil Defense, Emergencies and Elimination on Consequences of Natural Disasters, Borisa Galushkina St., 4, Moscow, 129366, Russian Federation; ORCID: 0000-0002-2524-8710; e-mail: akperov01@mail.ru

Alexsandr O. OVCHINNIKOV, Undergraduate, the State Fire Academy of the Ministry of Russian Federation for Civil Defense, Emergencies and Elimination on Consequences of Natural Disasters, Borisa Galushkina St., 4, Moscow, 129366, Russian Federation; ORCID: 0009-0004-4570-878X; e-mail: sasha_trewq07@mail.ru

Contribution of the authors:

Sergey V. Puzach — scientific management; research concept; methodology development; participation in development of curricula and their implementation; writing the draft; final conclusions.

Nataliya I. Konstantinova — research concept; methodology development; participation in development of curricula and their implementation; writing the draft; final conclusions.

Ruslan G. Akperov — research concept; methodology development; follow-on revision of the text; final conclusions.

Alexsandr O. Ovchinnikov — methodology development; follow-on revision of the text; final conclusions.

The authors declare no conflicts of interests.

Влияние светопогоды на текстильные средства индивидуальной защиты от падения с высоты в строительной отрасли

Дмитрий Александрович Корольченко ✉, Сергей Георгиевич Цариченко,
Дмитрий Александрович Простакишин, Надежда Александровна Кашинова

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

АННОТАЦИЯ

Введение. По информации Министерства труда и социальной защиты Российской Федерации наиболее распространенным видом несчастных случаев с травмами и со смертельным исходом на производстве является падение при разности уровней высот. Анализ таких несчастных случаев за 2022 и 2023 гг. в разрезе видов экономической деятельности свидетельствует, что наибольшее количество несчастных случаев с тяжелыми последствиями происходит в строительстве.

Цель работы. Обеспечение безопасности людей с помощью средств индивидуальной защиты (СИЗ) при выполнении работ на высоте в строительной отрасли.

Задачи. Анализ научных работ, посвященных влиянию светопогоды на текстильные средства защиты; анализ группы ГОСТов, регулирующих сертификацию СИЗ от падения с высоты на предмет наличия технических требований и методов испытания текстильных изделий и лакокрасочных покрытий на воздействие светопогоды, в том числе солнечной радиации; постановка проблемы и разработка рекомендаций по дальнейшей работе в данном направлении.

Аналитическая часть. Рассматривается безопасность применения текстильных средств индивидуальной защиты от падения с высоты как одних из самых распространенных видов защиты на строительной площадке, которые подвергаются воздействию светопогоды. Анализ научно-технических источников показывает, что воздействие света (особенно ультрафиолета), а также комбинированное воздействие света, температуры, влажности и других атмосферных условий приводит к деградации текстильных СИЗ. На основании комплексного анализа, проведенного в работе, сделан вывод о потребности нормативного регулирования данной области текстильных СИЗ в области технических требований и методов испытаний, а также необходимости проведения дополнительных параметрически ориентированных исследований в данном направлении.

Выводы. Опубликованные источники не содержат информацию о светопогодостойкости текстильных СИЗ. Анализ опубликованных исследований свидетельствует о негативном влиянии атмосферных условий на текстильные и полимерные материалы. Определена необходимость разработки методологии испытаний и сбалансированных требований к сопротивлению материала воздействию светопогоды, так как существующие ГОСТы в области СИЗ от падения с высоты не распространяются на данные текстильные СИЗ и имеют функционально не ориентированные критерии определения негативного воздействия светопогоды.

Ключевые слова: охрана труда; концепция нулевого травматизма; полимерный текстиль; ультрафиолетовое излучение; фотодеструкция

Для цитирования: Корольченко Д.А., Цариченко С.Г., Простакишин Д.А., Кашинова Н.А. Влияние светопогоды на текстильные средства индивидуальной защиты от падения с высоты в строительной отрасли // Пожаровзрывобезопасность/Fire and Explosion Safety. 2024. Т. 33. № 1. С. 60–72. DOI: 10.22227/0869-7493.2024.33.01.60-72

✉ Корольченко Дмитрий Александрович, e-mail: ikbs@mgsu.ru

The effect of light and weather on textile personal protective equipment against falls from a height in the construction industry

Dmitriy A. Korolchenko ✉, Sergey G. Tsarichenko, Dmitry A. Prostakishin,
Nadezhda A. Kashinova

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

ABSTRACT

Introduction. According to the information of the Ministry of Labour and Social Protection of the Russian Federation, the most common type of accidents with injuries and fatalities at work is a fall at different heights. The analysis of such accidents for 2022 and 2023 by types of economic activity shows that the largest number of accidents with severe consequences occurs in construction.

Purpose of the work. To ensure the safety of people with the help of personal protective equipment (PPE) when performing work at a height in the construction industry.

Objectives. Analysis of scientific works devoted to the influence of light and weather on textile protective equipment. Analysis of the group of GOSTs regulating the certification of PPE against falling from a height for the presence of technical requirements and methods of testing textiles and paint coatings for the impact of light and weather, including solar radiation; problem statement and development of recommendations for further work in this direction.

Analytical part. The safety of application of textile personal protective equipment against falling from a height as one of the most widespread types of protection at the construction site, which are exposed to the impact of light and weather, is considered. The analysis of scientific and technical sources shows that exposure to light (especially ultraviolet), as well as the combined effects of light, temperature, humidity and other atmospheric conditions leads to the degradation of textile PPE. On the basis of the complex analysis carried out in the paper, the conclusion is made about the need for normative regulation of this area of textile PPE in the field of technical requirements and test methods, as well as the need for additional parameter-oriented research in this direction.

Conclusions. Published sources do not contain information on light and weather resistance of textile PPE. The analysis of published studies indicates the negative influence of atmospheric conditions on textile and polymeric materials. The necessity of development of test methodology and balanced requirements to the material resistance to light and weather impact is determined, as the existing GOSTs in the field of PPE against falls from a height do not apply to these textile PPE and have functionally unoriented criteria for determining the negative impact of light and weather.

Keywords: labour protection; zero injury concept; polymeric textile; ultraviolet radiation; photodegradation; polymer textile

For citation: Korolchenko D.A., Tsarichenko S.G., Prostakishin D.A., Kashinova N.A. The effect of light and weather on textile personal protective equipment against falls from a height in the construction industry. *Pozharovzryvobezopasnost/Fire and Explosion Safety*. 2024; 33(1):60-72. DOI: 10.22227/0869-7493.2024.33.01.60-72 (rus).

✉ Dmitriy Aleksandrovich Korolchenko, e-mail: ikbs@mgsu.ru

Введение

С течением времени и приходом инноваций [1] в строительную отрасль она стремительно развивается и трансформируется. Одним из главных достоинств внедрения новых технологий в строительство является снижение травматизма и продвижение концепции нулевого травматизма¹ [2]. По данным Министерства труда и социальной защиты Российской Федерации (далее — Минтруд России), количество несчастных случаев с тяжелыми последствиями, полученными работниками в период с 2014 по 2021 г., значительно уменьшилось² [3] (рис. 1).

Такого результата удалось добиться благодаря реализации данным министерством комплекса надзорно-контрольных мер, а также более добро-совестному отношению работодателей к соблюдению техники безопасности и улучшению рабочих условий [4]. Однако при общем снижении уровня травматизма работы на высоте все еще остаются наиболее травмоопасными: их доля от общего количества травм, полученных работниками в 2020 г., составляет 33,1 % [3] (рис. 2).

¹ Минтруд России стал официальным партнером глобальной кампании Концепции «нулевого травматизма». URL: <https://mintrud.gov.ru/labour/safety/261>

² Результаты мониторинга условий и охраны труда в Российской Федерации в 2021 году. URL: eisol.rosmintrud.ru/attachment/339_attachments_article_47_monitoring-2021.pdf

Согласно приказу Минтруда России, для предотвращения падений и травм, получаемых на высоте, работодатель обязан предоставлять работникам средства защиты от падений с высоты³ [5]. Существуют средства коллективной защиты от падений с высоты (СКЗ) и средства индивидуальной защиты от падения с высоты (СИЗ). В соответ-

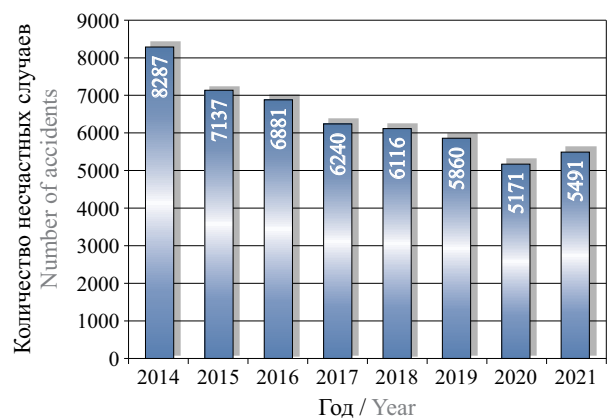


Рис. 1. Количество несчастных случаев с тяжелыми последствиями в 2014–2021 гг. (по данным Минтруда России)

Fig. 1. Number of accidents with severe consequences in 2014–2021 (according to the Ministry of Labour of Russia)

³ Об утверждении Правил обеспечения работников средствами индивидуальной защиты и срывающими средствами № 766н от 29 октября 2021 г. (редакция от 29.10.2021). URL: https://www.consultant.ru/document/cons_doc_LAW_405210/



Рис. 2. Распределение количества несчастных случаев с тяжелыми последствиями по видам происшествий в 2021 г. (по данным Минтруда России)

Fig. 2. Distribution of the number of accidents with severe consequences by types of accidents in 2021 (according to the Ministry of Labour of Russia)

ствии с ГОСТ Р 58208–2018⁴ при использовании СИЗ выделяют пять основных систем обеспечения безопасности при выполнении работ на высоте: удерживающую, позиционирования на рабочем

⁴ ГОСТ Р 58208–2018. Система стандартов безопасности труда. Средства индивидуальной защиты от падения с высоты. Системы индивидуальной защиты от падения с высоты. Общие технические требования : утвержден и введен в действие Приказом Федерального агентства по техническому регулированию и метрологии от 23 августа 2018 г. № 519-ст : дата введения 2019-03-01. URL: <https://protect.gost.ru/document.aspx?control=7&id=231392>

месте, канатного доступа, страховочную и спасательную [6].

Для производства СИЗ от падения с высоты используются различные материалы: синтетические полимеры или различные сплавы металлов (сталь, нержавеющая сталь, алюминий). К текстильной группе СИЗ можно отнести канаты с сердечником низкого растяжения, стропы, привязи, амортизаторы, текстильные анкерные устройства, в том числе временные анкерные линии. Все эти изделия изготавливаются из синтетического полимерного текстиля [7]. В области СИЗ полимерный текстиль представлен такими материалами, как полиамид, полиэфир и полипропилен. Полиамид (РА) состоит из повторяющихся звеньев, связанных амидными связями (–CONH–). Этот полимер может быть изготовлен из диаминов и дикарбоновых кислот или аминокислот. СИЗ из полимерного текстиля в основном включают нейлон 6 (изготовленный из капролактама) и нейлон 6.6 (изготовленный из гексаметилендиамина и адипиновой кислоты) [8]. Полиэфиры состоят из повторяющихся звеньев, связанных сложноэфирными связями (–COO–). Наиболее распространенным полиэфиром является полиэтилен-терефталат (ПЭТ), изготавливаемый из этиленгликоля и терефталевой кислоты⁵. Полипропилен (ПП) — это полиолефин, получаемый из мономеров пропилена. Он состоит из повторяющихся звеньев пропена и не содержит функциональных групп, таких как амид или сложный эфир, которые есть в полиамидах и полиэфирах.

За весь цикл эксплуатации и хранения текстильные СИЗ переносят воздействие многих разрушающих факторов, включая физико-химические. Это влажность воздуха, температура, ультрафиолетовое излучение, солнечная радиация, окислительные процессы и т.п. Все эти факторы объединяются одним термином — светопогода [9]. При длительной работе в атмосферных условиях полимерные материалы подвергаются «изнашиванию» и могут терять часть своих физико-механических свойств, что крайне негативно сказывается на обеспечении безопасности деятельности пользователя [10].

Рассмотрим влияние светопогоды более подробно. Первым и немаловажным фактором является влажность воздуха, которая напрямую влияет на структуру и прочность полимерного текстиля. При протекании процессов сорбции воды из окружающей среды (дождь, туман) влажность воздуха повышается, и это может вызвать набухание, увеличение массы и изменение структуры полимера и даже разрушение его волокон [11]. Под действием сорбируемой воды может

⁵ См. статью производителя текстильных канатов и веревок ООО «РЕМЕРА»: Виды и свойства материалов для производства синтетических канатов. URL: <http://remera.ru/content/sravnenie-materialov-sinteticheskie-kanaty-iz-chego-oni-sdelany>



Рис. 3. Пример использования текстильных СИЗ от падения с высоты в условиях воздействия светопогоды
Fig. 3. Example of the use of textile PPE against falls from a height under light and weather conditions

происойти вымывание из полимерного текстиля красителей, стабилизаторов, антиоксидантов, защищающих от других разрушающих факторов, например света. Солнечный спектр является катализатором некоторых химических реакций, приводящих к изменению структуры или даже состава полимерной ткани, что в свою очередь снижает ресурсность и прочность изделий при использовании СИЗ от падения с высоты.

В случае эксплуатации изделия все вышеперечисленные факторы воздействуют на него одновременно и комплексно, что усиливает процессы взаимосвязанных реакций. Многоцикличный процесс воздействия отрицательных или положительных температур при повышенной влажности воздуха или дополнительно при повышенной концентрации солей в нем приводит к разрушению структуры кристаллических решеток полимеров. Совмещенные реакционные и массообменные процессы дают комплексный цикл неблагоприятных условий для изделий, которые работают на защиту пользователя от падения с высоты.

Материалами, аналогичными по свойствам полимерному текстилю, являются различные клеи, эпоксидные смолы, лакокрасочные материалы, которые рассмотрим более подробно. Лакокрасочные матери-

алы широко применяются не только в промышленном и гражданском строительстве, но и для защиты конструкций при строительстве нефтегазовых платформ и последующей эксплуатации их в морских средах, в строительстве электросетевых конструкций ЛЭП и т.д.

В целях защиты конструкций, разрабатываемых на десятилетия эксплуатации, изучены и проведены работы по исследованию воздействия светопогоды, в ходе которых применялись корректировки в области испытаний лакокрасочных покрытий, переписывались требования к материалам и вводились корректировки в технологические процессы производства изделий из полимеров. В комплексе данные процедуры естественным образом двигают индустрию к улучшению качества продукции, ее безопасности, продлению сроков эксплуатации. Данный положительный опыт создает благоприятную атмосферу для проведения научно-исследовательской работы в сфере воздействия светопогоды на текстильные материалы, которые используются в изготовлении СИЗ от падения с высоты и напрямую влияют на безопасность пользователя (рис. 3).

Цель анализа — обеспечение безопасности людей, выполняющих работы на высоте в строи-

тельной отрасли; улучшение качества выпускаемой на рынок СИЗ продукции в целях повышения ее стойкости к воздействию светопогоды.

Задачи исследования состоят в анализе научных работ, посвященных влиянию светопогоды на текстильные изделия, описанию методов испытаний их в камере искусственного климатического старения; в анализе группы государственных стандартов, регулирующих сертификацию СИЗ от падения с высоты на предмет наличия технических требований и методов испытания текстильных изделий и лакокрасочных покрытий на воздействие светопогоды, в частности солнечной радиации; в постановке проблемы и разработке рекомендаций по дальнейшей работе в данном направлении.

Анализ литературных источников, в которых затрагивается проблема негативного влияния светопогоды на текстиль

Воздействие солнечного света, влаги и температуры на текстильные материалы рассматривается в большом количестве статей применительно к другим сферам человеческой деятельности. Научные исследования по воздействию светопогоды (солнечного света, тепла и влаги) на текстильные материалы могут варьироваться в зависимости от конкретных аспектов исследования.

В статье [12] авторы исследуют и подтверждают протекание фотоокислительных процессов в полимерных материалах, а также изучают влияние добавок мела на изменение скорости деградации физико-механических свойств под действием ультрафиолетового излучения. Для подтверждения протекания фотоокислительных процессов используют данные двух методов: модифицированного йодометрического анализа и инфракрасной спектроскопии. В ходе эксперимента установлено, что меловая добавка препятствует интенсивному протеканию фотоокислительной деструкции, а также снижает деградацию прочностных показателей композитов на основе переработанного полипропиленового сырья после воздействия ультрафиолетового облучения в естественных условиях.

Влияние ультрафиолета на текстиль также рассматривает в своей диссертации А.В. Галкин [13]. Автор поставил перед собой цель разработать методологию исследования текстильных материалов, применяемых на объектах культурного наследия, усовершенствовать методы ускоренного старения и воздействия инсоляции на текстиль. В ходе работы автор получил данные по влиянию излучения на усадку материала, изменение прочностных характеристик ткани, таких как поверхностная плотность, жесткость при изгибе, разрывная нагрузка.

Потеря прочности тканей, используемых для изготовления текстильных исторических объектов и их реставрации, после воздействия 288 ч инсоляции составила около 93,6 %.

Не только ультрафиолетовое излучение оказывает негативное влияние на текстиль, о чем в работе [14] пишет Е.В. Бочкарева. Она с помощью теоретических и экспериментальных методов исследования изучила и сопоставила процессы износа тканей в естественных и искусственных лабораторных условиях, сделала вывод о деструктивном влиянии светопогоды на ткань, об уменьшении разрывной нагрузки и ухудшении полезных свойств. В результате исследования было выявлено, что свет, тепло и влага не влияют на рисунок переплетения тканей, так как образцы не подвергались механическому воздействию, однако при этом происходит набухание ткани и увеличение ее плотности. При экспонировании в течение 12 ч образцов в приборе дневного света автор получил данные о снижении разрывной нагрузки полимерных тканей в среднем на 18 %.

Похожие выводы, но для параарамидных нитей, получены О.В. Никитиным [9]. В ходе исследования им установлено, что наиболее эффективно на деградацию свойств полимерного текстиля влияет ультрафиолетовая часть солнечного спектра с длиной волны 290–350 нм: энергии данного спектра оказалось достаточно для разрушения макромолекул по связям С–С. Кроме того, в данной работе были получены функциональные зависимости между механическими свойствами параарамидных нитей и длительностью воздействия светопогоды в естественных и искусственных условиях с различными источниками излучения, а также установлено соответствие времени их воздействия на параарамидные нити.

Затрагивая близкую к обычной жизни человека тему в работе [15], авторы показывают, как изменяется разрывная нагрузка материала, применяемого для производства палаток. Воздействие светопогоды осуществлялось в естественных условиях и на приборе дневного света. Например, в [15] приводится информация о том, что при воздействии в течение 208 ч естественной светопогоды на палаточную ткань и материал «оксфорд» они теряют от своей разрывной нагрузки, соответственно, 27,5 и 28 %. При воздействии в течение 100 ч искусственной светопогоды палаточная ткань и материал «оксфорд» теряют от своей разрывной нагрузки, соответственно, 26,6 и 27 %. Авторами [15] был сделан вывод, что воздействие светопогоды снижает прочность тканей.

Большая разница в показателях, полученных авторами, обусловлена тем, что в ходе исследования использовались различные типы ткани, кото-

рые подвергались испытаниям в разных условиях. Тем не менее авторы пришли к одному выводу, что происходит негативное влияние светопогоды на физико-механические свойства ткани или полимерного текстиля.

Анализ ГОСТов в области текстильных СИЗ

Средства индивидуальной защиты от падения с высоты, изготавливаемые из текстильных материалов [16–18], представлены гибкими анкерными линиями, в том числе временными, стропами различных видов, привязями, амортизаторами, текстильными анкерными устройствами (рис. 4).

Согласно техническому регламенту стран Таможенного союза 019/2011⁶ [19, 20], все эти средства обязаны соответствовать определенным требованиям, за обеспечение выполнения которых отвечают государственные стандарты. В них же представлены методы испытаний на соблюдение требований технического регламента [17, 21–23].

Анализ показал, что во всех девяти государственных стандартах, имеющих отношение к СИЗ от падения с высоты текстильного исполнения (рис. 5), отсутствуют требования к светопогодостойкости, а также методы испытаний, позволяющие оценить изделия по данному критерию.

Анализ ГОСТов по испытаниям лакокрасочных покрытий, полимерных материалов и текстильных изделий

Прецедентом наличия данных требований и методов испытаний на светостойкость являются стандарты, регулирующие сферу лакокрасочных покрытий, полимерных материалов и текстильных изделий. Их светопогодостойкость — важный критерий для сертификации, ведь под воздействием светопогоды изменяются свойства полимеров, лакокрасочных покрытий и текстиля: цвет, прочность и т.д.

Существует довольно большое количество государственных стандартов, разработанных в нашей стране или адаптированных, которые регулируют производство, методы испытаний и требования к изделиям. В таблице представлены некоторые из них.

Анализ таблицы показал, что требования к светопогодостойкости и методы испытаний содержатся в разных государственных стандартах и применимы к различным видам материалов в разных изделиях. В ходе испытаний оценивается климатическая стой-



a



b

Рис. 4. Пример текстильных СИЗ от падения с высоты: *a* — привязь; *b* — канат с сердечником низкого растяжения

Fig. 4. Example of textile PPE against falls from a height: *a* — harness; *b* — rope with low tensile core

кость лакокрасочных покрытий (рис. 6 и 7), полимерных изделий и текстиля.

При этом из проведенного анализа следует, что отсутствуют технические требования по воздействию светопогоды на текстильные СИЗ, которые непосредственно коррелировались бы с основными функциональными и прочностными характеристиками.

⁶ Технический регламент Таможенного союза. ТР ТС 019/2011. О безопасности средств индивидуальной защиты.

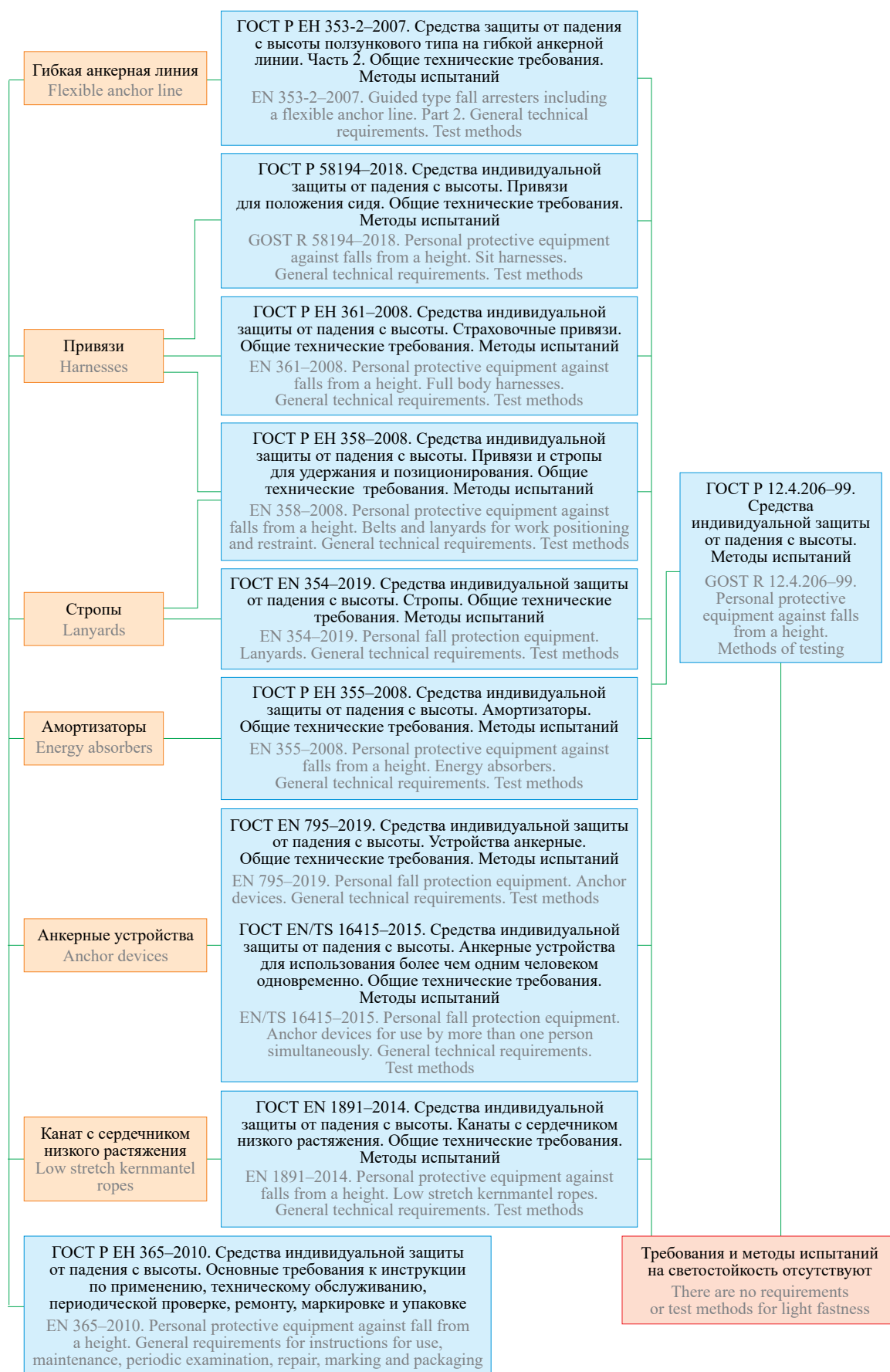


Рис. 5. Виды текстильных средств индивидуальной защиты от падения с высоты
Fig. 5. Types of textile personal protective equipment against falls from a height

ГОСТы, относящиеся к полимерным материалам, лакокрасочным покрытиям и текстильным изделиям
GOSTs related to polymeric materials, coating and textile products

ГОСТ / GOST	Описание требований к материалу и методы испытаний Description of material requirements and test methods
ГОСТ Р ИСО 105-B10–2015. Материалы текстильные. Определение устойчивости окраски. Часть B10. Искусственное климатическое старение. Метод воздействия отфильтрованным излучением ксеноновой дуги ISO 105-B10:2011. Textiles — Tests for colour fastness — Part B10: Artificial weathering — Exposure to filtered xenon-arc radiation (IDT)	Стандарт содержит методы испытания окрашенных текстильных материалов, подвергающихся искусственному климатическому старению, включая влияние воды и водяного пара, в устройстве с ксеноновой дугой для определения их устойчивости к разрушению под влиянием атмосферных условий. Воздействие осуществляют в испытательной камере отфильтрованным излучением от ксеноновой дуги, имитирующим спектральную энергетическую освещенность солнечного света The standard contains methods for testing coloured textile materials subjected to artificial climatic aging, including the influence of water and steam, in a xenon arc device to determine their resistance to destruction under the influence of atmospheric conditions. The effect is carried out in the test chamber by filtered radiation from the xenon arc, simulating the spectral energy illumination of sunlight
ГОСТ 9.708–83. Единая система защиты от коррозии и старения. Пластмассы. Методы испытаний на старение при воздействии естественных и искусственных климатических факторов GOST 9.708–83. Unified system of corrosion and ageing protection, plastics. Ageing test methods on exposure to natural and artificial climatic factors	Стандарт распространяется на пластмассы в ненапряженном состоянии и устанавливает методы испытаний на старение при воздействии естественных и искусственных климатических факторов. Методы предназначены для сравнительной оценки стойкости пластмасс к указанному старению The standard applies to plastics in a non-stressed state and establishes methods of aging tests under the influence of natural and artificial climatic factors. The methods are intended for a comparative assessment of the resistance of plastics to the specified aging
ГОСТ 21903–76. Материалы лакокрасочные. Методы определения условной светостойкости GOST 21903–76. Paint materials. Methods of relative light-fastness determination	Стандарт распространяется на лакокрасочные материалы и неорганические пигменты и устанавливает три метода определения условной светостойкости The standard applies to paints and varnishes and inorganic pigments and establishes three methods for determining conditional light resistance
ГОСТ 33119–2014. Конструкции полимерные композитные для пешеходных мостов и путепроводов. Технические условия 33119–2014. Polymer composites constructions for foot-bridges. Specifications	Стандарт включает в себя требования к физико-механическим свойствам полимерных композитных конструктивных элементов и методам контроля свойств материала, а также требования к особенностям расчета и конструирования таких элементов при проектировании пешеходных мостов и путепроводов. Имеются также требования к морозостойкости, влагостойкости, термостойкости, стойкости к климатическому старению The standard includes requirements for the physical and mechanical properties of polymer composite structural elements and methods for controlling material properties, as well as requirements for the specifics of the calculation and construction of such elements in the design of pedestrian bridges and overpasses. There are also requirements for frost resistance, moisture resistance, heat resistance, and resistance to climatic aging
ГОСТ Р 55307–2012. Материалы текстильные. Метод стендовых натурных испытаний устойчивости к действию светопогоды GOST 55307–2012. Materials textile. Method of stand model tests stability to action of light and weather	Стандарт распространяется на текстильные материалы (полотна, нити) и устанавливает метод оценки влияния светопогодных воздействий на их физико-механические свойства. Метод основан на экспонировании испытуемых образцов на открытом воздухе при воздействии естественных климатических факторов с последующим определением разрывной нагрузки экспонированных образцов. Устойчивость к действию светопогоды оценивают коэффициентом потери разрывной нагрузки от исходного значения, кинетическими зависимостями потери прочности материала и инсоляционным индексом The standard applies to textile materials (webs, threads) and establishes a method for assessing the effect of light and weather influences on their physical and mechanical properties. The method is based on exposing the test samples outdoors under the influence of natural climatic factors, followed by determining the breaking load of the exposed samples. Resistance to the action of light and weather is estimated by the coefficient of loss of breaking load from the initial value, the kinetic dependences of the loss of strength of the material and the insolation index

ГОСТ / GOST	Описание требований к материалу и методы испытаний Description of material requirements and test methods
ГОСТ 9.401–2018. Единая система защиты от коррозии и старения. Покрытия лакокрасочные. Общие требования и методы ускоренных испытаний на стойкость к воздействию климатических факторов GOST 9.401–2018. Unified system of corrosion and ageing protection. Paint coatings. General requirements and methods of accelerated tests on resistance to the influence of climatic factors	Стандарт содержит общие требования к лакокрасочным покрытиям и единую методологию оценки их долговечности. Он также предусматривает проведение испытаний по оценке климатической стойкости лакокрасочных покрытий для установления предполагаемого срока службы лакокрасочного покрытия. Самым достоверным способом определения срока службы лакокрасочного покрытия является проведение испытаний в природных условиях на действие: солнечного излучения, влаги, осадков в виде дождя или снега, перепадов температур, коррозионно-активных загрязнений, пыли. Ускорение старения в лабораторных условиях возможно за счет непрерывного воздействия определенных факторов, т.е. за счет увеличения продолжительности воздействий, а также за счет повышения их интенсивности. Разработчиками ГОСТ 9.401 были выбраны такие условия испытаний, при которых скорость процесса в лабораторных условиях заметно возрастает, а характер физико-химических процессов остается таким же, как в природных условиях The standard contains general requirements for paint coatings and a unified methodology for assessing their durability. It also provides for conducting tests to assess the climatic resistance of paint coatings to establish the expected service life of the paint coating. The most reliable way to determine the service life of a paint coating is to conduct tests in natural conditions for the effect of: solar radiation, moisture, precipitation in the form of rain or snow, temperature changes, corrosive pollutants, dust. Acceleration of aging in laboratory conditions is possible due to the continuous exposure to certain factors, i.e. by increasing the duration of exposure, as well as by increasing their intensity. The developers of GOST 9.401 have chosen such test conditions under which the speed of the process in laboratory conditions increases markedly, and the nature of the physico-chemical processes remains the same as in natural conditions



Рис. 6. Пример испытаний лакокрасочных покрытий для судов в естественных условиях

Fig. 6. Example of testing paint coatings for ships in natural conditions



Рис. 7. Отслаивание лакокрасочного покрытия в процессе естественного старения

Fig. 7. Flaking of paint covering due to natural ageing process

Выводы

Большая часть работ в строительстве на высоте производится в атмосферных условиях, когда изделие подвергается воздействию влаги, температуры и света, оказывающих негативное влияние на прочность изделия, что сокращает срок годности его безопасного использования. На сегодняшний день в опубликованных источниках отсутствует информация о светопогодостойкости текстильных СИЗ.

В ходе работы был проведен анализ результатов исследований воздействия светопогоды на текстиль-

ные материалы. Существует немалое количество статей, где прямо и косвенно доказывается негативное влияние атмосферных условий на текстильные и полимерные материалы. Широкое применение этих материалов в изготовлении СИЗ от падения с высоты обуславливает необходимость наличия методологии испытаний и сбалансированных требований к сопротивлению материала воздействию светопогоды.

При этом анализ государственных стандартов, относящихся к области СИЗ от падения с высоты, показал, что в них отсутствуют требования к свето-

погодостойкости и необходимые методики для проведения соответствующих испытаний изделий. Хорошим примером прецедента наличия таких требований и методик являются государственные стандарты в области полимерных материалов, лакокрасочных покрытий и текстильных изделий, а также стандарты, описывающие методы воздействия инсоляции на материалы. Однако проблема заключается в том, что эти стандарты для повышения безопасности СИЗ не распространяются на данные текстильные СИЗ и имеют функционально не ориентированные критерии определения негативного воздействия светопогоды.

Коллектив авторов считает необходимым проведение ряда НИР в области воздействия светопогоды на текстильные материалы с последующей разработкой технических требований и, что важно, методов испытаний на соответствие этим требованиям. Встает вопрос о необходимости внесения изменений в существующие стандарты или разработки новых, для чего требуется профессиональное обсуждение этого вопроса с учетом мнений всех сторон (изготовителей, потребителей, испытательных лабораторий, сертификационных органов), на базе научно-технических исследований.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Приходько Н. Апгрейд строительной отрасли. Версия-2030 // Вестник: Строительство. Архитектура. Инфраструктура. 2019. № 2 (113). С. 22–29.
2. Семенова А.Г., Данилова Е.В. Инновационные технологии как эффективные инструменты снижения производственного травматизма // Инновации и инвестиции. 2019. № 8. С. 19–21.
3. Агошков А.И., Курочкин П.А., Шилкин Е.А. Повышение безопасности производства работ на высоте совершенствованием обучения по охране труда (на примере строительных организаций) // Аспирант. 2020. № 5 (56). С. 24–28.
4. Пузырев А.М., Козырева Л.В. Актуальные вопросы нововведений в правилах по охране труда при работе на высоте // Вестник Тверского государственного технического университета. Серия: Строительство. Электротехника и химические технологии. 2021. № 3 (11). С. 13–20. DOI: 10.46573/2658-7459-2021-13-20
5. Степанова К.А. Разработка регламентированной процедуры выдачи средств индивидуальной защиты // Точная наука. 2023. № 141. С. 4–7.
6. Сенченко В.А., Карауш С.А., Пушенко С.Л., Стасева Е.В. О значении технических средств безопасности при выполнении работ на высоте // Охрана и экономика труда. 2018. № 1 (30). С. 66–71.
7. Аминев А.А., Кошутин Е.А., Кондратьева Е.П. Анализ материалов, используемых для изготовления средств индивидуальной защиты от падения с высоты // Семьдесят третья Всеросс. науч.-техн. конф. студентов, магистрантов и аспирантов высших учебных заведений с международным участием, Ярославль, 20 апреля 2020 г. : сб. мат. конф. в 2 ч. Часть 2. Ярославль : Ярославский государственный технический университет, 2020. С. 318–321.
8. Sedláček D., Roso M., Viel L., Perotto N., Caven B., Hasler M. et al. Ageing of climbing ropes with and without hydrophobic coating // Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part P: Journal of Sports Engineering and Technology. 2021. DOI: 10.1177/17543371211062816
9. Никитина О.В. Разработка метода прогнозирования механических свойств параарамидных нитей после воздействия светопогоды : дис. ... канд. техн. наук. М., 2012. 200 с.
10. Daniel Sedláček D., Roso M., Manian A.P. The effect of a hydrophobic coating on the photodegradation of dyed Nylon 6 Yarns // Fibers and Polymers. 2023. Vol. 24. Pp. 3889–3900. DOI: 10.1007/12221-023-00311-8
11. Шевченко А.А. Химическое сопротивление неметаллических материалов и защита от коррозии : уч. пос. М. : КолосС, 2004. 246 с.
12. Salikhov R.B., Bazunova M.V., Salikhov T.R., Bazunova A.A., Zakharov V.P. Study of the effect of photooxidative processes on the surface morphology and physico-mechanical characteristics of biodegradable materials based on secondary polypropylene and chalk additives // Letters on Materials. 2020. Vol. 10 (3). Pp. 288–293. DOI: 10.22226/2410-3535-2020-3-288-293
13. Галкин А.В. Разработка методологии исследования материалов для воссоздания исторического текстильного объекта : дис. ... канд. техн. наук. М., 2021. 199 с.
14. Бочкарева Е.В. Разработка методов прогнозирования физико-механических свойств тканей ведомственного назначения после действия светопогоды : автореф. дис. ... канд. техн. наук. М., 2007. 16 с.
15. Белкин С.А., Белкина С.Б. Влияние светопогоды на свойства палаточных тканей // Дизайн, технологии и инновации в текстильной и легкой промышленности (ИННОВАЦИИ–2015) : сб. мат. Междунар. науч.-техн. конф., Москва, 17–18 ноября 2015 г. Часть 2. М. : Московский государственный университет дизайна и технологии, 2015. С. 127–129.
16. Василенко В.В. Актуализация методики динамических испытаний амортизаторов как средств индивидуальной защиты от падения с высоты // Строительство — формирование среды жизнедеятельности :

- сб. трудов XX Междунар. межвуз. науч.-практ. конф. студентов, магистрантов, аспирантов и молодых ученых, Москва, 26–28 апреля 2017 г. М. : Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет, 2017. С. 439–441.
17. Леликов Г.Д., Василенко В.В., Корольченко Д.А. Анализ применения страховочных стропов из синтетических канатов как СИЗ от падения с высоты // Строительство — формирование среды жизнедеятельности : сб. трудов XX Междунар. межвуз. науч.-практ. конф. студентов, магистрантов, аспирантов и молодых ученых, Москва, 26–28 апреля 2017 г. М. : Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет, 2017. С. 475–477.
 18. Гаджиев Р.С., Антонова В.А., Простакишин Д.А., Карасева Т.А. Определение остаточной прочности полиамидной веревки через 24 месяца после воздействия сильных кислот // Безопасность труда в промышленности. 2022. № 10. С. 54–59. DOI: 10.24000/0409-2961-2022-10-54-59
 19. Pham N.T., Vasilenko V.V. Stability of ladders when working at heights and safety while performing this type of work // Journal of Physics: Conference Series : International Scientific Conference on Modelling and Methods of Structural Analysis, Moscow, November 13–15, 2019. Vol. 1425. No. 012190. DOI: 10.1088/1742-6596/1425/1/012190
 20. Zherdev K., Korolchenko O., Gadzhiyev R. Polyspast — personal fall protection equipment. Features of certification and certification tests // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. 2021. Vol. 1030. P. 01203. DOI: 10.1088/1757-899x/1030/1/012036
 21. Антонова В.А., Василенко В.В., Леликов Г.Д., Громов Н.В. Обеспечение безопасности на строительной площадке. Методика статического испытания шва из минеральной ваты на продавливание между плитой перекрытия и фасадом здания на этапе «строительства» // Безопасность труда в промышленности. 2021. № 6. С. 61–68. DOI: 10.24000/0409-2961-2021-6-61-68
 22. Василенко В.В., Жердев К.В., Шовикова А.В., Шуиунова Н.С. Анализ применения элементов страховочных направляющих «волна» в конструкции жестких анкерных линий на ВЛ 35 кВ и выше // Электроэнергия. Передача и распределение. 2022. № 4 (73). С. 98–103.
 23. Жердев К.В., Василенко В.В., Богданов М.С. Обеспечение комплексной безопасности высотных работ на опорах решетчатого типа воздушных линий электропередачи 35 кВ и выше // Электроэнергия. Передача и распределение. 2023. № 1 (76). С. 130–139.

REFERENCES

1. Prikhodko N. Upgrade of the construction industry. Version 2030. *Bulletin: Construction. Architecture. Infrastructure*. 2019; 2(113):22-29. (rus).
2. Semenova A.G., Danilova E.V. Innovative technologies as effective tools to reduce industrial injuries. *Innovation & Investment*. 2019; 8:19-21. (rus).
3. Agoshkov A.I., Kurochkin P.A., Shilkin E.A. An enhance of work at height safety by comprehensive professional safety education programs. *Postgraduate*. 2020; 5(56):24-28. (rus).
4. Puzyrev A.M., Kozyreva L.V. Urgent issues of innovations in work at height safety regulations. *Vestnik of Tver State Technical University. Series: Building. Electrical Engineering and Chemical Technology*. 2021; 3(11):13-20. DOI: 10.46573/2658-7459-2021-13-20 (rus).
5. Stepanova K.A. Development of a regulated procedure for issuing personal protective equipment. *Exact Science*. 2023; 141:4-7. (rus).
6. Senchenko V.A., Karaush S.A., Pushenko S.L., Staseva E.V. About the importance of technical safety facilities when performing works at the height. *Protection and Economics Labor*. 2018; 1(30):66-71. (rus).
7. Amineva A.A., Koshutina E.A., Kondratyeva E.P. Analysis of materials, used for manufacture of means of individual protection from altitude. *Seventy-third All-Russian scientific and technical conference of students, undergraduates and graduate students of higher educational institutions with international participation. April 20, 2020, Yaroslavl : collection of conference materials. In 2 parts. Part 2*. Yaroslavl, Yaroslavl State Technical University Publ., 2020; 318-321. (rus).
8. Sedláček D., Roso M., Viel L., Perotto N., Caven B., Hasler M. et al. Ageing of climbing ropes with and without hydrophobic coating. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part P : Journal of Sports Engineering and Technology*. 2021. DOI: 10.1177/17543371211062816
9. Nikitina O.V. *Development of a method for predicting the mechanical properties of para-aramid threads after exposure to light weather : diss. ... Candidate of Technical Sciences*. Moscow, 2012; 200. (rus).

10. Daniel Sedláček D., Roso M., Manian A.P. The effect of a hydrophobic coating on the photodegradation of dyed nylon 6 Yarns. *Fibers and Polymers*. 2023; 24:3889-3900. DOI: 10.1007/12221-023-00311-8
11. Shevchenko A.A. *Chemical resistance of non-metallic materials and corrosion protection : textbook*. Moscow, KolosS, 2004; 246. (rus).
12. Salikhov R.B., Bazunova M.V., Salikhov T.R., Bazunova A.A., Zakharov V.P. Study of the effect of photooxidative processes on the surface morphology and physico-mechanical characteristics of biodegradable materials based on secondary polypropylene and chalk additives. *Letters on Materials*. 2020; 10(3):288-293. DOI: 10.22226/2410-3535-2020-3-288-293
13. Galkin A.V. *Development of a materials research methodology for recreating a historical textile object : diss. ... Candidate of Technical Sciences*. Moscow, 2021; 199 (rus).
14. Bochkareva E.V. *Development of methods for predicting the physical and mechanical properties of departmental fabrics after exposure to light weather : abstr. diss. ... Candidate of Technical Sciences*. Moscow, 2007; 16. (rus).
15. Belkin S.A., Belkina S.B. The influence of light weather on the properties of tent fabrics. *Design, Technology and Innovation in the Textile and Light Industry (INNOVATIONS-2015) : collection of materials of the International Scientific and Technical Conference, Moscow, November 17–18, 2015. Part 2*. Moscow, Moscow State University of Design and Technology Publ., 2015; 127-129. (rus).
16. Vasilenko V.V. Updating the methodology for dynamic testing of shock absorbers as personal protective equipment against falling from a height. *Construction — formation of the living environment : collection of proceedings of the XX International Interuniversity Scientific and Practical Conference of Students, Masters, Graduate Students and Young Scientists, Moscow, April 26–28, 2017*. Moscow, National Research Moscow State University of Civil Engineering, 2017; 439-441. (rus).
17. Lelikov G.D., Vasilenko V.V., Korolchenko D.A. Analysis of the use of safety lanyards made of synthetic ropes as personal protective equipment against falls from a height. *Construction — formation of the living environment : collection of proceedings of the XX International Interuniversity Scientific and Practical Conference of Students, Masters, Graduate Students and Young Scientists, Moscow, April 26–28, 2017*. Moscow, National Research Moscow State University of Civil Engineering, 2017; 475-477. (rus).
18. Gadzhiev R.S., Antonova V.A., Prostakishin D.A., Karaseva T.A. Determination of the residual strength of a polyamide rope 24 months after exposure to strong acids. *Occupational Safety in Industry*. 2022; 10:54-59. DOI: 10.24000/0409-2961-2022-10-54-59 (rus).
19. Pham N.T., Vasilenko V.V. Stability of ladders when working at heights and safety while performing this type of work. *Journal of Physics: Conference Series : International Scientific Conference on Modelling and Methods of Structural Analysis, Moscow, November 13–15, 2019*. Moscow, 2019; 1425:012190. DOI: 10.1088/1742-6596/1425/1/012190
20. Zherdev K., Korolchenko O., Gadzhiyev R. Polyspast — personal fall protection equipment. Features of certification and certification tests. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*. 2021; 1030:01203. DOI: 10.1088/1757-899x/1030/1/012036
21. Antonova V.A., Vasilenko V.V., Lelikov G.D., Gromov N.V. Ensuring safety at the construction site. Methodology of static testing of the mineral wool joint for punching between the floor slab and building facade during the construction stage. *Occupational Safety in Industry*. 2021; 6:61-68. DOI: 10.24000/0409-2961-2021-6-61-68 (rus).
22. Vasilenko V.V., Zherdev K.V., Shovikova A.V., Shushunova N.S. Study of application of auxiliary “wave” guide components in rigid anchor lines at 35 kV and higher overhead lines. *Electric Power. Transmission and Distribution*. 2022; 4(73):98-103. (rus).
23. Zherdev K.V., Vasilenko V.V., Bogdanov M.S. Provision of integrated safety and security of working at height on lattice towers of 35 kV and higher overhead transmission lines. *Electric Power. Transmission and Distribution*. 2023; 1(76):130-139. (rus).

Поступила 04.12.2023, после доработки 29.12.2023;

принята к публикации 09.01.2024

Received December 4, 2023; Received in revised form December 29, 2023;

Accepted January 9, 2024

Информация об авторах

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

ЦАРИЧЕНКО Сергей Георгиевич, д-р техн. наук, профессор кафедры комплексной безопасности в строительстве, Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет, Россия, 129337, г. Москва, Ярославское шоссе, 26; РИНЦ ID: 181475; Scopus AuthorID: 181475; ORCID: 0000-0002-9807-6841; e-mail: tsarichenko_s@mail.ru

ПРОСТАКИШИН Дмитрий Александрович, инженер испытательной лаборатории Института комплексной безопасности в строительстве, Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет; Россия, 129337, г. Москва, Ярославское шоссе, 26; РИНЦ ID: 1092806; ORCID: 0009-0008-5350-6976; e-mail: d.prostakishin@ikbs-mgsu.ru

КАШИНОВА Надежда Александровна, лаборант испытательной лаборатории института комплексной безопасности в строительстве; Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет; Россия, 129337, г. Москва, Ярославское шоссе, 26; ORCID: 0009-0005-9723-9644; e-mail: nadezhdakashinova@yandex.ru

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

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Information about the authors

Dmitriy A. KOROLCHENKO, Dr. Sci. (Eng.), Docent, Head of Department of Integrated Safety in Civil Engineering, Moscow State University of Civil Engineering (National Research University), Yaroslavskoe shosse, 26, Moscow, 129337, Russian Federation; ID RISC: 352067; Scopus AuthorID: 55946060600; ResearcherID: E-1862-2017; ORCID: 0000-0002-2361-6428; e-mail: ikbs@mgsu.ru

Sergey G. TSARICHENKO, Dr. Sci. (Eng.), Professor of Department of Integrated Safety in Civil Engineering, Moscow State University of Civil Engineering (National Research University), Yaroslavskoe shosse, 26, Moscow, 129337, Russian Federation; ID RISC: 181475; Scopus AuthorID: 181475; ORCID: 0000-0002-9807-6841; e-mail: tsarichenko_s@mail.ru

Dmitriy A. PROSTAKISHIN, Engineer of Testing Laboratory of Institute of Complex Safety in Construction, Moscow State University of Civil Engineering (National Research University), Yaroslavskoe shosse, 26, Moscow, 129337, Russian Federation; ID RISC: 1092806; ORCID: 0009-0008-5350-6976; e-mail: d.prostakishin@ikbs-mgsu.ru

Nadezhda A. KASHINOVA, Laboratory Technician of Testing Laboratory of Institute of Complex Safety in Construction, Moscow State University of Civil Engineering (National Research University), Yaroslavskoe shosse, 26, Moscow, 129337, Russian Federation; ORCID: 0009-0005-9723-9644; e-mail: nadezhdakashinova@yandex.ru

Contribution of the authors: all authors have made an equivalent contribution to the preparation of the publication.

The authors declare that there is no conflict of interest.

ПОЖАРОВЗРЫВБЕЗОПАСНОСТЬ/FIRE AND EXPLOSION SAFETY. 2024. Т. 33. № 1. С. 73–82
POZHAROVZRYVOBEZOPASNOST/FIRE AND EXPLOSION SAFETY. 2024; 33(1):73-82

НАУЧНАЯ СТАТЬЯ/RESEARCH PAPER

УДК 621.039.58

<https://doi.org/10.22227/0869-7493.2024.33.01.73-82>

О проблемах функционирования современной системы управления охраной труда

Евгений Борисович Сугак ✉, Антон Дмитриевич Корольченко

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

АННОТАЦИЯ

Введение. Правительством Российской Федерации поставлена задача по реформированию традиционной модели управления охраной труда и созданию современной системы управления охраной труда (СУОТ), основанной на реализации практических процедур, которые характеризуются как «управление профессиональными рисками».

Методология. В современных условиях на практике используется концепция «приемлемого риска». Управление профессиональными рисками представляет собой циклическую последовательность выполнения взаимосвязанных практических действий, известных как «цикл Деминга–Шухарта».

Результаты и их обсуждение. Функционирование новой модели СУОТ способствует переходу от практики реагирования на уже произошедшие факты производственного травматизма и профессиональных заболеваний к механизму разработки и выполнению превентивных профилактических мер по предупреждению несчастных случаев, по сохранению здоровья трудового коллектива. В рамках реализации задач реформирования в стране разработаны и приняты ряд нормативно-правовых документов, которые содержат рекомендации по внедрению современной системы предупреждения производственного травматизма и профессиональных заболеваний, базирующихся на методиках по управлению профессиональными рисками.

Выводы. Несмотря на усилия государственных структур и общественных организаций процесс реформирования системы управления охраной труда на предприятиях осуществляется медленно, или проходит формально, не затрагивая основное содержание современной модели охраны труда. Невыявленные или сокрытые факты произошедших инцидентов в десятки раз уменьшают объем информации, предназначенной для анализа реальной обстановки, и существенно сокращают эффективность работ по управлению профессиональными рисками.

Ключевые слова: статистика производственного травматизма; опасность явного вида; опасность скрытого вида; индикатор Международной организации труда

Для цитирования: Сугак Е.Б., Корольченко А.Д. О проблемах функционирования современной системы управления охраной труда // Пожаровзрывобезопасность/Fire and Explosion Safety. 2024. Т. 33. № 1. С. 73–82. DOI: 10.22227/0869-7493.2024.33.01.73-82

✉ Сугак Евгений Борисович, e-mail: SugakEB@mgsu.ru

Functioning of a modern occupational safety management system

Evgeny B. Sugak ✉, Anton D. Korolchenko

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

ABSTRACT

Introduction. The Government of the Russian Federation set a task to reform the traditional model of occupational safety management and create a modern occupational safety management system (OSMS) based on the implementation of practical procedures that are characterized as “occupational risk management”.

Methodology. In modern conditions, the concept of “acceptable risk” is used in practice. Occupational risk management is a cyclical sequence of interrelated practices known as the “Deming – Shewhart cycle”.

Results and their discussion. The functioning of the new OSMS model facilitates the transition from the practice of responding to the facts of occupational injuries and occupational diseases that have already occurred to the mechanism of developing and implementing preventive measures to prevent accidents and preserve the health of the labour collective. As part of the implementation of reform tasks, the country

has developed and adopted a number of regulatory and legal documents that contain recommendations for the introduction of a modern system for the prevention of occupational injuries and diseases based on occupational risk management techniques.

Conclusions. Despite the efforts of state structures and public organizations, the process of reforming the occupational safety management system at enterprises is slow or formal, not affecting the main content of the modern model of labour protection. Undisclosed or concealed facts of incidents reduce the volume of information for analyzing the real situation ten times and significantly reduce the effectiveness of work on occupational risk management.

Keywords: occupational injury statistics; explicit type hazard; hidden type hazard; International Labour Organization indicator

For citation: Sugak E.B., Korolchenko A.D. Functioning of a modern occupational safety management system. *Pozharovzryvobezopasnost/Fire and Explosion Safety*. 2024; 33(1):73-82. DOI: 10.22227/0869-7493.2024.33.01.73-82 (rus).

✉ Evgeny Borisovich Sugak, e-mail: SugakEB@mgsu.ru

Введение

С 1 марта 2022 г. начали действовать новые правила в области охраны труда, которые добавили работодателям обязанностей: выявлять опасности и профессиональные риски, проводить их регулярный анализ и оценку; осуществлять мероприятия по улучшению условий охраны труда; разрабатывать меры по обеспечению безопасных условий труда перед вводом в эксплуатацию производственных объектов; контролировать органы профсоюза в области соблюдения трудового законодательства и иных актов; вести учет и расследование микротравм. В 2024 г. вступают в действие ряд нововведений по охране труда на предприятии, про которые нужно знать работодателям уже сейчас.

Охрана труда подразумевает не только наличие соответствующего специалиста, но также требует проведения различных мер, к которым относятся обучение по охране труда и инструктажи, выдача средств индивидуальной защиты (СИЗ), обеспечение безопасности рабочего места и др.¹

Выполняя постановления Правительства РФ, в стране разработаны и введены в действие пакет нормативных документов в виде национальных стандартов, сводов правил и приказов Минтруда РФ, посвященных методическим и организационным аспектам внедрения новой системы управления охраной труда, базирующейся на превентивных действиях по устранению профессиональных рис-

ков^{2, 3, 4, 5}. Нормативная база отражает современный подход к функционированию системы управления охраной труда, который идентичен, в том числе, методическим документам Международной организации труда. К новым задачам также адаптировали Трудовой кодекс РФ, в раздел X «Охрана труда» внесены комплексные изменения, направленные на создание эффективной системы управления, введены понятия «профессиональный риск» и «управление профессиональными рисками»⁶. В целом затраты на охрану труда в обществе в 2022 г. увеличились на 32,6 % по сравнению с 2021 г. Была введена комплексная программа по снижению рисков травматизма персонала. Затраты на реализацию Комплексной программы по снижению рисков травматизма персонала в 2020–2023 гг. составили почти 3,5 млрд руб. [1].

Сегодняшняя модель управления безопасностью труда включает в себя мероприятия, которые названы «управление профессиональными рисками» [2–4]. Под управлением понимают весь процесс работы, направленный на устранение или предотвращение негативных последствий производственной деятельности. Важно выполнить их как можно раньше до того момента, когда угрозы будут иметь место быть и нанесут вред здоровью работника.

² ГОСТ Р 54934–2012. Системы менеджмента безопасности труда и охраны здоровья. Требования.

³ ГОСТ 12.0.230.3–2016. Система стандартов безопасности труда. Системы управления охраной труда. Оценка результативности и эффективности.

⁴ ГОСТ 12.0.230.5–2018. Система стандартов безопасности труда (ССБТ). Системы управления охраной труда. Методы оценки риска для обеспечения безопасности выполнения работ.

⁵ ГОСТ Р ИСО 45001–2020. Системы менеджмента безопасности труда и охраны здоровья. Требования и руководство по применению.

⁶ Примерное положение о системе управления охраной труда. Приказ Минтруда РФ № 776н от 29.10.2021.

¹ Голикова Т.А. О мерах, направленных на улучшение условий труда, сохранение жизни и здоровья работников : доклад на заседании Правительства РФ 27 октября 2011 года // Охрана труда и техника безопасности в строительстве. 2012. № 1. С. 7–11. URL: <https://mgsu.ru/resources/izdatelskaya-deyatelnost/izdaniya/izdaniya-otkr-dostupa/>

В результате создания и внедрения новой системы в области травматизма и профессиональных заболеваний процесс переходит от реагирования на факты, которые уже произошли, к разработке и реализации профилактических мер по предотвращению несчастных случаев. Эти меры направлены на защиту и сохранение здоровья персонала [5–8].

Один из ключевых аспектов нового подхода к обеспечению безопасности труда заключается в том, чтобы активно решать потенциальные опасности и вредности, которые пока еще не проявились, но находятся в скрытом состоянии. С целью предотвращения возможных последствий необходимо своевременно выявить и оценить эти угрозы, а затем внедрить организационно-технические меры для их минимизации или полного устранения [9, 10].

Именно заблаговременное выявление и ликвидация производственных опасностей и вредностей позволяет обеспечить действенный профилактический эффект, который слабо проявлялся при реализации методов традиционной модели охраны труда, устраняющих причины травматизма уже после произошедшего несчастного случая, после факта повреждения здоровья работника [5].

Реализация мер профилактического характера в новой модели охраны труда затрагивает все аспекты производственной деятельности предприятия и представляется в оптимальном варианте как переход от системы управления под названием «простое производство» к системе управления под названием «безопасное производство». Это означает максимальную интеграцию системы управления охраной труда (СУОТ) в общую управленческую систему, где вопросы производства решаются в интересах удобства работы персонала, а организация безопасного рабочего места оказывает влияние на технологию и оборудование производственного процесса. Таким образом, в сферу полномочий и ответственности нынешней модели управления охраной труда теперь входят задачи по созданию объективно безопасной производственной среды с расширенными контрольными функциями. Прежде, в традиционной СУОТ, служба охраны труда особое внимание уделяла контролю за работой персонала на имеющемся оборудовании и технологии, в новой модели вся управленческая пирамида несет повышенную ответственность за безопасность труда и имеет возможность и должна влиять на создание технологического процесса и используемого оборудования с низким уровнем опасности [11–13].

Расширенные задачи, стоящие перед новой системой управления охраной труда, кардинально меняет структуру трудоохранной деятельности. Ранее для контроля за работой персонала, проведения обучения и прочего достаточен был ресурс

отдела охраны труда, состоящего из нескольких специалистов. Сегодня для решения вопросов, влияющих на безопасность оборудования и технологического процесса, старого потенциала недостаточно. Поэтому в новой системе СУОТ в соответствии с Трудовым кодексом РФ⁷ задействованы работодатель и вся управленческая структура с расширенными должностными обязанностями по охране труда. Кроме того, в качестве проявления политики социального партнерства к участию в управлении безопасностью труда рекомендуется привлекать и трудовой коллектив в рамках Комитета по охране труда при работодателе⁸.

Таким образом, в нормативно-методическом плане созданы благоприятные условия для трансформации модели охраны труда. Однако на практике внедрение методик по управлению профессиональными рисками происходит с большими затруднениями, нередко формально или с низкой эффективностью, что дискредитирует сам модернизационный подход к улучшению условий труда, ставит под сомнение возможность реализации на отечественных площадках позитивного зарубежного опыта [14–16].

Целью данного исследования является оценка текущей ситуации и эффективности действующей системы управления охраной труда, определение существующих недостатков и пробелов, а также выработка рекомендаций для их устранения.

Методология

Профессиональные риски означают вероятность возникновения вреда здоровью при исполнении работником своих обязанностей по трудовому договору. Эти риски обусловлены опасными и вредными производственными факторами, которые объективно присутствуют на каждом рабочем месте, а также тяжестью и напряженностью трудовой нагрузки персонала. Ранее считалось, что необходимо стремиться к созданию абсолютной безопасности, к недопущению любых негативных проявлений в производственной среде. Однако от концепции «нулевого риска» пришлось отказаться, так как работа во всех сферах жизнедеятельности, особенно в области материального производства, сопровождается рисковыми ситуациями, которых невозможно полностью избежать. В современных условиях на практике используется концепция «приемлемого риска», т.е. риска, уровень которого признается приемлемым государственными инстанциями, производственным сообществом,

⁷ Трудовой кодекс Российской Федерации. В редакции от 25.12.2023.

⁸ Примерное положение о комитете (комиссии) по охране труда. Приказ Минтруда РФ от 22.09.2021 № 650н.

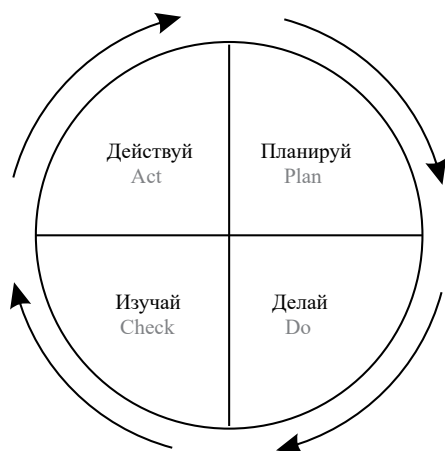


Рис. 1. Графическое изображение цикла Деминга – Шухарта
Fig. 1. Graphical representation of the Deming – Shewhart cycle

общественными организациями и самими рабочими коллективами [17].

Управление профессиональными рисками представляет собой циклическую последовательность выполнения взаимосвязанных практических действий, известных как «цикл Деминга – Шухарта» (рис. 1). Цикл включает несколько этапов: планирование – осуществление – изучение результата – действие. По завершении работ последнего этапа следует начинать новый цикл тех же практических действий на тех же рабочих местах, но с новыми целями и задачами по снижению рисков. Выполнение одинаковых циклических процедур реализует в решении проблемы так называемый «процессный подход», который позволяет обеспечивать возможности для деятельности по непрерывному улучшению условий труда, по постоянному совершенствованию системы управления охраной труда [18, 19]. Поэтому графическое изображение цикла Деминга – Шухарта обычно представляют в виде окружности, которая никогда не заканчивается и которая не имеет ни начальной, ни финишной точки.

В общем виде выполнение процедур цикла Деминга – Шухарта представляет собой определенный алгоритм действий руководства компании по минимизации профессиональных рисков. Процесс включает следующие этапы [20].

1. *Планирование.* Проводится аудит реального состояния условий труда. По результатам анализа фактического состояния рабочих мест разрабатывается перечень необходимых мероприятий и устанавливаются цели, которые должны быть достигнуты в ходе работ по первому циклу.

2. *Реализация.* Этап реализации запланированных действий по снижению рисков возглавляет то руководящее лицо, которое эти риски создает. Для работника риски создает работодатель и непосредственный руководитель производственного

участка, т.е. тот, кто предоставляет ему рабочее место, инструмент и прочее.

3. *Изучение результата.* Этап цикла, на котором проводится промежуточный мониторинг реализации работ 2-го этапа. Дается предварительная оценка эффективности проведенным мероприятиям. Возможна корректировка первоначальных программ.

4. *Действие.* В цикле Деминга – Шухарта этот этап относится к деятельности высшего руководства компании. Работодатель дает оценку первому циклу процессного подхода и при необходимости вносит корректировки в планы работ. В случае достижения запланированных результатов устанавливаются новые задачи и цели по снижению рисков в рамках следующего цикла.

Результаты и их обсуждение

Одной из основных проблем, мешающих реализации методик по управлению профессиональными рисками, являются стереотипы традиционного подхода к выявлению конкретных обстоятельств производственного травматизма. На практике в большинстве случаев причинами инцидента признаются факторы субъективного характера, которые возникают и проявляются в связи с так называемым «человеческим фактором». Устоявшееся мнение, что несчастный случай произошел из-за нарушения работником правил техники безопасности, плохо согласуется с методикой управления профессиональными рисками. При подобной оценке произошедшего инцидента реагирующие действия должностных лиц компании также состоят из реализации мероприятий, в основном, субъективной направленности: привлечение к ответственности работника-нарушителя, специалистов службы охраны труда, других должностных лиц, а также усиление контроля, проведение дополнительного обучения и инструктажа работников и др. Перечень возможных действий по управлению рисками в таком случае показывает ограниченные возможности руководства предприятия существенно влиять на уровень производственных опасностей и вредностей и, тем самым, осуществлять само управление профессиональными рисками.

В современной системе управления охраной труда идеология основывается на признании объективных причин возникновения несчастных случаев и профессиональных заболеваний. Одним из основных факторов является наличие профессиональных рисков на каждом рабочем месте, которые отражают существующие опасности и вредности в производстве [21, 22]. Когда эти опасности и вредности проявляются, они наносят работнику травму различной степени тяжести.

Субъективные причины инцидента также должны учитываться в оценке профессионального риска, но они будут играть не основную, а вспомогательную роль. Поэтому сущность управления профессиональными рисками состоит в том, чтобы мерами объективного характера, реализацией организационно-технических мероприятий отреагировать на объективные угрозы рабочим местам, а именно минимизировать уровень опасных факторов и тем самым не допустить повреждения здоровья работника. Подобное направление деятельности позволяет провести упреждающие действия, которые дают возможность предотвратить потерю работником его трудоспособности [21, 22].

Другой важной методической проблемой деятельности в системе СУОТ является работа по выявлению, распознаванию и оценке профессиональных рисков, которые характеризуются как риск-ориентированные процедуры. Профессиональные риски отражают присутствие производственных опасностей и вредностей на рабочих местах, по своей природе они являются объективными составляющими рабочей среды.

Производственные опасные и вредные факторы существуют в двух формах: явной и скрытой (неявной) [20, 21]. Опасности и вредности, присутствующие в трудовом процессе, но еще не проявившиеся и не воздействовавшие на организм работника, относятся к скрытому состоянию. Скрытые опасности представляют особую угрозу условиям труда, поскольку их значительно больше, чем явных опасностей, уже нанеших вред здоровью работника. Помимо количественного аспекта, существует и качественная оценка скрытых опасностей. Потенциальное воздействие скрытых опасностей на персонал может вызывать более тяжелые и самые непредсказуемые последствия. Скрытые опасности могут быть связаны с различными производственными факторами:

- физические факторы: шум, вибрация, электромагнитное излучение, ионизирующее излучение и т.д.;
- химические факторы: вредные вещества, пыль, газы и пары;
- биологические факторы: микроорганизмы, бактерии, вирусы и т.д.;
- психофизиологические факторы: монотонность труда, нервно-эмоциональное напряжение и т.д.

Скрытые опасности могут привести к различным заболеваниям и травмам работников, включая: заболевания органов дыхания, заболевания сердечно-сосудистой системы, заболевания нервной системы, заболевания опорно-двигательного аппарата, травмы и переломы. Для выявления и устранения скрытых опасностей на производстве необходимо проводить регулярные обследования и проверки рабочих мест, а также разрабатывать

и внедрять меры по защите работников от вредных и опасных производственных факторов.

К явному виду производственных угроз относятся те опасности и вредности, которые проявились и вызвали какое-то повреждение здоровья человека. Независимо от степени тяжести травмы, необходимо проводить расследование и регистрацию несчастного случая, чтобы в дальнейшем можно было определить причины происшествия и разработать меры по их устранению. Для выявления явных опасностей и вредностей проводятся регулярные инспекции рабочих мест, а также анализ данных о несчастных случаях и профессиональных заболеваниях. По результатам этих мероприятий разрабатываются меры по устранению или снижению производственных рисков. Важной задачей является повышение информированности работников о производственных опасностях и вредностях. Для этого проводятся инструктажи по охране труда, организуются курсы повышения квалификации и т.д. Также необходимо обеспечивать работников средствами индивидуальной защиты. Таким образом, для обеспечения безопасности труда необходимо своевременное выявление и устранение явных производственных угроз, проведение регулярных инспекций рабочих мест, повышение информированности работников о производственных опасностях и вредностях, а также обеспечение их средствами индивидуальной защиты.

В практике управления профессиональными рисками процедуры выявления и распознавания производственных опасностей и вредностей, находящихся в явном и неявном состоянии, осуществляются разными способами. Выявление опасностей и вредностей, находящихся в неявном состоянии, происходит при выполнении работ по изучению производственной среды методами монографического анализа: систематическими замерами эксплуатационных параметров оборудования и производственной обстановки, испытаний механизмов и защитных устройств, проверок систем контроля и управления, регулярными обходами и визуальными осмотрами рабочих мест, опросов и бесед с персоналом и др. Похожие работы на отечественных предприятиях проводятся и проводились в рамках процедур по специальной оценке условий труда, а ранее при аттестации рабочих мест по условиям труда. Распознавание опасностей до их возможного воздействия на человека позволяет заблаговременно реализовать предупредительные организационно-технические меры по снижению уровня риска до допустимого значения. Подобные исследовательские работы требуют определенной квалификации персонала и наличия измерительной аппаратуры. При реализации соответствующей подготовки

и материально-техническом обеспечении оценку производственной среды в состоянии выполнять специалисты службы охраны труда предприятия.

Легализация опасностей, находящихся ранее в скрытом состоянии, позволяет перевести их из неявной формы в явное состояние. Таким образом, формируется общий массив данных по негативным производственным угрозам, которые являются первым этапом цикла Деминга – Шухарта. Для их минимизации следует на практике реализовать организационно-технические мероприятия, содержащие действия под названием «управление профессиональными рисками». Эффективность мероприятий в значительной степени будет зависеть от того, насколько качественно и тщательно было выполнено расследование, насколько полно были выявлены и зафиксированы опасности явного и неявного состояния.

Американский экономист Г.-У. Гейнрих установил, что между количеством опасных производственных факторов и степенью тяжести от их проявления существует определенная и устойчивая числовая зависимость (рис. 2). В соответствии с разработанной им «пирамидой травматизма» из 300–330 опасных производственных факторов следует ожидать происхождение 29–30 несчастных случаев с потерей трудоспособности, один из которых будет с тяжелыми последствиями [21]. Полученная зависимость означает, что эффективность трудовой деятельности в значительной степени будет зависеть от полноты выявления и учета производственных угроз. Если в результате соответствующих мероприятий получится снизить количество производственных опасностей, которые выражаются через уменьшение размера основания «пирамиды травматизма» (рис. 1), то удастся достичь реального сокращения всех видов несчастных случаев с разной степенью повреждений — легкой, средней или тяжелой. Г.-У. Гейнрих



Рис. 2. Пирамида травматизма Г.-У. Гейнриха
Fig. 2. The Heinrich's Injury Pyramid

определил эту зависимость как «эффект айсберга»: видимая надводная часть айсберга (количество несчастных случаев) уменьшается только в том случае, если сократится невидимая скрытая подводная часть (количество производственных опасностей). То есть чем существеннее удастся снизить размер основания «пирамиды травматизма», тем положительнее это отразится на безопасности труда по всем степеням повреждений.

К сожалению, в практической деятельности этап работы по учету производственных опасностей и вредностей в цикле по управлению профессиональными рисками ведется с большими методическими ошибками. Они выражаются в том, что значительная часть произошедших инцидентов не учитывается, проявление производственных опасностей не фиксируется, а следовательно, причины несчастного случая не расследуются. Если сравнить показатели учета производственного травматизма стран Евросоюза с данными по российским предприятиям, то увидим огромный разрыв между ними. В частности, в европейских странах регистрируется в 15–20 раз больше несчастных случаев, чем у нас, но это не означает, что отечественное производство более безопасно. Наоборот, тщательная регистрация фактов потери трудоспособности в результате проявления опасностей и вредностей позволяет зарубежным работодателям более эффективно исполнять предупредительные, профилактические действия.

Нарушения в системе учета и регистрации особенно заметно отражаются в статистике смертельного травматизма, ее зависимости от числа зарегистрированных несчастных случаев. Так, установлено, что в США каждый 314-й несчастный случай заканчивался смертельной травмой, в Германии — каждый 1687-й, в Великобритании — каждый 1034-й [6]. А в России на одну травму со смертельным исходом пришлось всего 26 зарегистрированных несчастных случаев. Международная организации труда, исходя из практики учета производственного травматизма в развитых странах, рекомендует для оценки фактического количества несчастных случаев использовать соотношение 500–1000:1, т.е. на 500–1000 зарегистрированных случаев травматизма потенциально происходит один инцидент с летальным исходом [23–25]. Исходя из индикатора МОТ реальное число травмированных в нашей стране может составлять в 28–56 раз больше, чем показывает статистика.

Анализируя представленную информацию, можно сделать вывод, что ситуация с отсутствием достоверных данных по явным и неявным опасным производственным факторам находится в противоречии с методикой управления профессиональными рисками [26–28]. Отсутствие данных по основному массиву проявления опасных факторов — по легким

и средним инцидентам — переводит производственные опасности из явного состояния в неявное, сокрытое состояние и создает искаженную картину об условиях труда. Исходя из этого можно сделать вывод, что отсутствие достоверных данных по явным и неявным опасным производственным факторам не позволяет эффективно применить методики по управлению профессиональными рисками [29]. Службам охраны труда предприятий следует более строго исполнять положения существующих нормативных документов, которые обязывают регистрировать инцидент как несчастный случай при потере работником трудоспособности уже начиная с одного дня.

Выводы

Реализация современных методик по управлению профессиональными рисками, на которую нацеливает государственная политика в сфере охраны труда, на практике сталкивается с определенными проблемами. Одной из причин затруднительного процесса внедрения является использование должностными лицами устаревших подходов к решению задач новой системы управления производственной безопасностью. В частности, к определению причин происхождения несчастных случаев, к методическим особенностям по выявлению и распознаванию производственных опасностей, к способам усиления профилактического эффекта от предупредительных мер.

Современная система управления охраной труда основана на том, что природа происхождения несчаст-

ных случаев имеет объективный характер и обусловлена наличием на каждом рабочем месте определенного уровня производственных опасностей и вредностей. Поэтому минимизация (устранение) профессиональных рисков обеспечивается развитием и формированием объективного фактора безопасности всей производственной среды. Влияние «человеческого фактора», субъективных качеств персонала на безопасность труда методическими документами Международной организации труда признается второстепенным. Выявление и распознавание производственных опасностей и вредностей составляет начальный этап цикла Деминга — Шухарта по управлению профессиональными рисками. В соответствии с положениями «пирамиды травматизма» Г.-У. Гейнриха от полноты идентификации явных и неявных негативных факторов производства в решающей степени зависит эффективность риск-менеджмента в сфере охраны труда.

К сожалению, отечественные компании скрывают значительную часть производственных инцидентов, регистрируются только тяжелые и летальные случаи, игнорируются легкие и средние повреждения, что переводит большую часть опасностей из явного состояния в неявное, сокрытое. Невыявленные или сокрытые факты произошедших инцидентов в десятки раз уменьшают объем информации, предназначенной для анализа реальной обстановки, и существенно сокращают эффективность работ по управлению профессиональными рисками.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. *Ткаченко П.В.* Статистика производственного травматизма в России в 2022 году // Онлайн-журнал Attek. 26 мая 2023 г. URL: <https://www.centrattek.ru/info/travmatizm-2022/>
2. *Гонтаренко А.Ф., Кловач Е.В., Цирин И.В.* Производственный травматизм и инновации в обучении по охране труда // Безопасность труда в промышленности. 2022. № 3. С. 84–92. DOI: 10.24000/0409-2961-2022-3-84-92
3. *Волкова Е.А.* Инновации в области охраны труда и безопасности жизнедеятельности на отечественных предприятиях // Трансформация экономических моделей: циркулярная экономика, «зеленое» управление проектами и искусственный интеллект : мат. Междунар. науч.-практ. конф., г. Москва, 23 декабря 2021 г. М. : Государственный университет управления, 2022. С. 32–36.
4. *Корнев Д., Машера А., Михайловский Н., Чернышева И.* Современные технологии в области промышленной безопасности и охраны труда // Главный энергетик. 2022. № 2. С. 65–67.
5. *Сугак Е.Б.* Особенности создания и функционирования современной системы управления охраной труда // Безопасность жизнедеятельности. 2019. № 10 (226). С. 3–7.
6. *Сугак Е.Б.* Учет производственного травматизма при реализации процедур по управлению профессиональными рисками // Безопасность жизнедеятельности. 2022. № 10 (262). С. 3–8.
7. *Панков В.А., Кулешова М.В.* Анализ риска производственного травматизма в основных отраслях промышленности // Анализ риска здоровью. 2021. № 4. С. 119–126. DOI: 10.21668/health.risk/2021.4.13
8. *Ферапонтов А.В., Яковлев Д.А., Кловач Е.В., Шалаев В.К.* Новые подходы к регулированию промышленной безопасности // Безопасность труда в промышленности. 2013. № 3. С. 9–11.
9. *Федотова И.В., Черникова Е.Ф., Некрасова М.М.* Методические основы оценки профессионального риска : учеб. пос. Н. Новгород : Медиаль, 2022. 224 с.

10. Бухтияров И. Проблемы оценки профессиональных рисков // Охрана труда и социальное страхование. 2015. № 2. С. 62–69.
11. Сугак Е.Б. К вопросу о реформе системы управления охраной труда // Безопасность жизнедеятельности. 2021. № 12 (252). С. 35–41.
12. Буренко Л.А., Казакова В.А. Источники производственных и профессиональных рисков на рабочих местах и методы их устранения // Безопасность труда в промышленности. 2014. № 5. С. 74–77.
13. Гражданкин А.И., Печеркин А.С., Сидоров В.И. Заменит ли количественная оценка риска выполнение требований промышленной безопасности // Безопасность труда в промышленности. 2012. № 10. С. 43–48.
14. Гончарова Э.А., Федорова С.В. Перспективные направления в области охраны труда // Безопасность-2023 : мат. XXVIII Всеросс. студенч. науч.-практ. конф. с междунар. участием, Иркутск, 19–21 апреля 2023 г. Иркутск : Иркутский национальный исследовательский технический университет, 2023. С. 118–121.
15. Shishkina S.V., Pristupa Yu.D., Pavlova L.D., Fryanov V.N. Cognitive simulation of incident risks in the structure of loading and transport enterprise // IOP Conference Series: Earth and Environmental Science. 2017. Vol. 84. Pp. 1–7 (012027). DOI: 10.1088/1755-1315/84/1/012027
16. Shishkina S.V., Pristupa Yu.D., Pavlova L.D., Fryanov V.N. The mechanism for assessing the personnel professional competencies at a loading and transport enterprise // IOP Conference Series: Earth and Environmental Science. 2018. Vol. 206. Pp. 1–6 (012052). DOI: 10.1088/1755-1315/206/1/012052
17. Сугак Е.Б. Профессиональные риски в строительстве: выявление и распознавание // Актуальные проблемы комплексной безопасности в строительстве, тенденции развития в современных условиях : сб. докладов Всеросс. науч.-практ. конф., г. Москва, 30 ноября 2022 г. М. : МГСУ, 2023. С. 15–17.
18. Мажкенев С.А. Новая концепция управления охраной труда на основе риск-ориентированного и процессного подходов // Экономика труда. 2022. Т. 9. № 9. С. 1373–1390. DOI: 10.18334/et.9.9.116308
19. Филимонов В.А., Горина Л.Н. Процессная модель системы управления охраной труда в организации // Безопасность труда в промышленности. 2018. № 4. С. 31–35. DOI: 10.24000/0409-2961-2018-4-31-35
20. Сугак Е.Б. К вопросу о выявлении и распознавании профессиональных рисков // Безопасность жизнедеятельности. 2019. № 1 (217). С. 3–8.
21. Heinrich H.-W. Industrial accident prevention: a scientific approach. New-York : McGraw-Hill, 1959. 480 p.
22. Карначев И.П., Николаев В.Г., Левашов С.П., Смирнова Н.К. Отечественная и зарубежная практика оценки рисков производственного травматизма // Безопасность жизнедеятельности. 2019. № 11 (227). С. 3–10.
23. Усикова О.В., Чаптыкова А.А. Проблемы статистического учета показателей производственного травматизма в Российской Федерации // Безопасность и охрана труда. 2020. № 1 (82). С. 10–11.
24. Сугак Е.Б. Влияние учета производственных угроз на эффективность управления профессиональными рисками // Безопасность труда в промышленности. 2023. № 9. С. 74–80. DOI: 10.24000/0409-2961-2023-9-74-80
25. Васильева А.Ю. Анализ статистических данных травматизма в оценке эффективности государственной политики в области охраны труда // Академическая публицистика. 2021. № 5. С. 57–61.
26. Анисимова Ю.С., Просин М.В. Влияние антропометрических характеристик в области охраны труда // Холодильная техника и биотехнологии : сб. тез. IV нац. конф. студентов, аспирантов и молодых ученых, Кемерово, 1–3 декабря 2022 г. Кемерово : Кемеровский государственный университет, 2023. С. 190–191.
27. Баранов Ю.В., Косинова Н.В. Оценка состояния социально-трудовых отношений в сфере охраны труда — путь к их развитию // Экономика труда. 2018. Т. 5. № 2. С. 503–512. DOI: 10.18334/et.5.2.39188
28. Самарская Н.А. Место и роль охраны труда в структуре социально-трудовых отношений // Экономика труда. 2024. Т. 11. № 1. С. 61–76. DOI: 10.18334/et.11.1.120208
29. Бакико Е.В., Сердюк В.С., Яковлева Е.В. Оценка состояния профессиональной компетентности специалистов в области охраны труда и ее влияние на социально-трудовые отношения // Вестник Омского университета. Серия: Экономика. 2020. № 3. С. 42–58. DOI: 10.24147/1812-3988.2020.18(3).42-58

REFERENCES

1. Tkachenko P.V. Statistics of occupational injuries in Russia in 2022. *Attek Journal*. May 26, 2023. URL: <https://www.centrattek.ru/info/travmatizm-2022/> (rus).
2. Gontarenko A.F., Klovach E.V., Tsirin I.V. Occupational injuries and innovations in the occupational safety training. *Occupational Safety in Industry*. 2022; 3:84-92. DOI: 10.24000/0409-2961-2022-3-84-92 (rus).
3. Volkova E.A. Innovations in the field of occupational safety and health at domestic enterprises. *Transformation of economic models: circular economy, "green" project management and artificial intelligence : mat. International Scientific and Practical Conference, Moscow, December 23, 2021*. Moscow, State University of Management, 2022; 32-36. (rus).

4. Kornev D., Mashera A., Mikhailovsky N., Chernysheva I. Modern technologies in the field of industrial safety and labor protection. *Chief Power Engineer*. 2022; 2:65-67. (rus).
5. Sugak E.B. Features of creation and functioning of a modern system of occupational safety management. *Life Safety*. 2019; 10(226):3-7. (rus).
6. Sugak E.B. Accounting for occupational injuries in the implementation of occupational risk management procedures. *Life Safety*. 2022; 10(262):3-8. (rus).
7. Pankov V.A., Kuleshova M.V. Analyzing risks of occupational injuries in basic industries. *Health Risk Analysis*. 2021; 4:119-126. DOI: 10.21668/health.risk/2021.4.13 (rus).
8. Ferapontov A.V., Yakovlev D.A., Klovach E.V., Shalaev V.K. New approaches to the regulation of industrial safety. *Occupational Safety in Industry*. 2013; 3:9-11. (rus).
9. Fedotova I.V., Chernikova E.F., Nekrasova M.M. *Methodological basis for assessing professional risk : textbook*. Nizhny Novgorod, Medial Publ., 2022; 224. (rus).
10. Bukhtiyarov I. Problems of assessing professional risks. *Occupational Safety and Social Insurance*. 2015; 2:62-69. (rus).
11. Sugak E.B. On the question of governance reform labor protection. *Life Safety*. 2021; 12(252):35-41. (rus).
12. Burenko L.A., Kazakova V.A. Sources of production and professional risks in the workplace and methods for their elimination. *Occupational Safety in Industry*. 2014; 5:74-77. (rus).
13. Grazhdankin A.I., Pecherkin A.S., Sidorov V.I. Will quantitative risk assessment replace compliance with industrial safety requirements? *Occupational Safety in Industry*. 2012; 10:43-48. (rus).
14. Goncharova E.A., Fedorova S.V. Promising directions in the field of labor protection. *Safety-2023 : mat. XXVIII All-Russian student scientific and practical conference with international Irkutsk, April 19–21, 2023*. Irkutsk, Irkutsk National Research Technical University, 2023; 118-121. (rus).
15. Shishkina S.V., Pristupa Yu.D., Pavlova L.D., Fryanov V.N. Cognitive simulation of incident risks in the structure of loading and transport enterprise. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*. 2017; 84:1-7(012027). DOI: 10.1088/1755-1315/84/1/012027
16. Shishkina S.V., Pristupa Yu.D., Pavlova L.D., Fryanov V.N. The mechanism for assessing the personnel professional competencies at a loading and transport enterprise. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*. 2018; 206:1-6(012052). DOI: 10.1088/1755-1315/206/1/012052
17. Sugak E.B. Professional risks in construction: identification and recognition. *Actual problems of complex safety in construction, development trends in modern conditions : collection of reports of the All-Russian Scientific and practical Conference., Moscow, November 30, 2022*. Moscow, MGSU, 2023; 15-17.
18. Mazhenkov S.A. A new concept of occupational safety based on risk- and process-oriented approaches. *Russian Journal of Labor Economics*. 2022; 9(9):1373-1390. DOI: 10.18334/et.9.9.116308 (rus).
19. Filimonov V.A., Gorina L.N. Process model of the occupational safety management system in the organization. *Occupational Safety in Industry*. 2018; 4:31-35. DOI: 10.24000/0409-2961-2018-4-31-35 (rus).
20. Sugak E.B. To the question of identification and recognition of occupational risks. *Life Safety*. 2019; 1(217):3-8. (rus).
21. Heinrich H.-W. *Industrial accident prevention: a scientific approach*. New-York, McGraw-Hill, 1959; 480.
22. Karnachev I.P., Nikolaev V.G., Levashov S.P., Smirnova N.K. Domestic and foreign practice of industrial injury risk assessment. *Life Safety*. 2019; 11(227):3-10. (rus).
23. Usikova O.V., Chaptiykova A.A. Problems of statistical accounting of occupational injuries in the Russian Federation. *Safety and Labor Protection*. 2020; 1(82):10-11. (rus).
24. Sugak E.B. The impact of accounting for industrial hazards on the efficiency of occupational risk management. *Occupational Safety in Industry*. 2023; 9:74-80. DOI: 10.24000/0409-2961-2023-9-74-80 (rus).
25. Vasilyeva A.Yu. Analysis of statistical data on injuries in assessing the effectiveness of state policy in the field of occupational safety. *Academic Journalism*. 2021; 5:57-61. (rus).
26. Anisimova Yu.S., Prosin M.V. The influence of anthropometric characteristics in the field of occupational safety. *Refrigeration Technology and Biotechnology : collection of abstracts of the IV National Conference of Students, postgraduates and young scientists, Kemerovo, December 1–3, 2022*. Kemerovo, Kemerovo State University, 2023; 190-191. (rus).
27. Baranov Yu.V., Kosinova N.V. Evaluation of the status of social and labour relations in the sphere of occupational safety as the way to their development. *Russian Journal of Labor Economics*. 2018; 5(2):503-512. DOI: 10.18334/et.5.2.39188 (rus).
28. Samarskaya N.A. The place and role of occupational safety in the structure of social and labor relations. *Russian Journal of Labor Economics*. 2024; 11(1):61-76. DOI: 10.18334/et.11.1.120208 (rus).
29. Bakiko E.V., Serdyuk V.S., Yakovleva E.V. Assessment of professional competence of experts in the field of labor protection and its impact on labor relations. *Herald of Omsk University. Series: Economics*. 2020; 3:42-58. DOI: 10.24147/1812-3988.2020.18(3).42-58 (rus).

*Поступила 15.12.2023, после доработки 11.01.2024;
принята к публикации 01.02.2024
Received December 15, 2023; Received in revised form January 11, 2024;
Accepted February 1, 2024*

Информация об авторах

СУГАК Евгений Борисович, канд. техн. наук, доцент, доцент кафедры комплексная безопасность в строительстве, Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет, Россия, 129337, г. Москва, Ярославское шоссе, 26; Scopus AuthorID: 57215944339; ResearcherID: AAD-9700-2022; ORCID: 0000-0003-2685-0890; e-mail: SugakEB@mgsu.ru

КОРОЛЬЧЕНКО Антон Дмитриевич, заведующий сектором испытаний научно-исследовательского центра «Взрывобезопасность» Института комплексной безопасности в строительстве, преподаватель кафедры комплексной безопасности в строительстве, соискатель на ученую степень кандидата технических наук, Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет, Россия, 129337, г. Москва, Ярославское шоссе, 26; РИНЦ ID: 890113; Scopus AuthorID: 57215919375; ResearcherID: E-3295-2017; ORCID: 0000-0002-1383-574X; e-mail: Anton.Korolchenko@ikbs-mgsu.ru

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

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Information about the authors

Evgeny B. SUGAK, Cand. Sci. (Eng.), Docent, Associate Professor of Department of Integrated Safety in Construction, Moscow State University of Civil Engineering (National Research University), Yaroslavskoe Shosse, 26, Moscow, 129337, Russian Federation; Scopus AuthorID: 57215944339; ResearcherID: AAD-9700-2022; ORCID: 0000-0003-2685-0890; e-mail: SugakEB@mgsu.ru

Anton D. KOROLCHENKO, Head of Testing Sector of Explosion Safety Research Center, Institute of Integrated Safety in Construction, Lecturer of Department of Integrated Safety in Construction, Moscow State University of Civil Engineering (National Research University), Yaroslavskoe Shosse, 26, Moscow, 129337, Russian Federation; ID RSCI: 890113; Scopus AuthorID: 57215919375; ResearcherID: E-3295-2017; ORCID: 0000-0002-1383-574X; e-mail: Anton.Korolchenko@ikbs-mgsu.ru

Contribution of the authors: all authors have made an equivalent contribution to the preparation of the publication.

The authors declare that there is no conflict of interest.

ПОЖАРОВЗРЫВБЕЗОПАСНОСТЬ/FIRE AND EXPLOSION SAFETY. 2024. Т. 33. № 1. С. 83–93
POZHAROVZRYVBEZOPASNOST/FIRE AND EXPLOSION SAFETY. 2024; 33(1):83-93

НАУЧНАЯ СТАТЬЯ/RESEARCH PAPER

УДК 519.841

<https://doi.org/10.22227/0869-7493.2024.33.01.83-93>

Кластеризация пожаров на объектах топливно-энергетического комплекса по ретроспективным статистическим данным для выявления рангов пожаров

Валерий Яковлевич Вилисов¹, Ренат Шамильевич Хабибулин²✉

¹ МГТУ им. Н.Э. Баумана (Мытищинский филиал), Московская обл., г. Мытищи, Россия

² Академия Государственной противопожарной службы Министерства Российской Федерации по делам гражданской обороны, чрезвычайным ситуациям и ликвидации последствий стихийных бедствий, г. Москва, Россия

АННОТАЦИЯ

Введение. Такое определение как «ранг пожара» используется в практике управления реагированием и ликвидации пожаров достаточно давно и имеет несколько смыслов, основные из которых два: укрупненно показать степень сложности пожара; исходя из ранга пожара, выделить адекватное количество различных видов ресурсов для успешной его ликвидации. Цепочка элементов: пожар – степень сложности – необходимые ресурсы, пока не воплощена в эффективные методики и нормативные документы, что придает актуальность данному направлению исследований.

Цели и задачи. Целью работы является разработка технологии построения моделей рангов пожаров на основе использования кластерного анализа. В числе задач — разведочный анализ данных и построение стохастической модели рангов пожаров.

Методы. В исследовании использованы методы математической статистики и машинного обучения без учителя в варианте кластерного анализа.

Результаты и обсуждение. Показана возможность определения сетки рангов пожара и соответствующего количества выделяемой автотехники на основе обработки методами кластерного анализа выборки ретроспективных данных о пожарах. Показано, что полученные результаты очень близки к нормам выделения автотехники на пожары в г. Москве. Выдвинута концепция стохастических рангов пожаров как более информативной модели для распределения ресурсов.

Выводы. Представленные результаты решения задачи выявления сетки рангов пожаров по выборке ретроспективных данных позволяют не только определять количество ресурсов, необходимых для ликвидации того или иного пожара на объектах ТЭК, но и дают возможность строить адаптивные стохастические модели рангов пожаров, адекватные региону, отрасли и иным подмножествам объектов пожара.

Ключевые слова: ликвидация пожаров; разведочный анализ; кластерный анализ; машинное обучение; распределение вероятностей применения автотехники

Для цитирования: Вилисов В.Я., Хабибулин Р.Ш. Кластеризация пожаров на объектах топливно-энергетического комплекса по ретроспективным статистическим данным для выявления рангов пожаров // Пожаровзрывобезопасность/Fire and Explosion Safety. 2024. Т. 33. № 1. С. 83–93. DOI: 10.22227/0869-7493.2024.33.01.83-93

✉ Хабибулин Ренат Шамильевич, e-mail: kh-r@yandex.ru

Clustering of fires at fuel and energy complex facilities using retrospective statistical data to identify fires ranks

Valeriy Ya. Vilisov¹, Renat Sh. Khabibulin²✉

¹ MSTU im. N.E. Bauman (Mytishchi branch), Moscow Region, Mytishchi, Russian Federation

² The State Fire Academy of the Ministry of Russian Federation for Civil Defense, Emergencies and Elimination on Consequences of Natural Disasters, Moscow, Russian Federation

ABSTRACT

Introduction. Such a definition as “fire rank” is used in the practice of fire respond and elimination management for quite a long time and has several meanings, the main of which are two: to show in detail the degree of complexity of the fire based on the fire rank, to allocate an adequate number of different types of resources for its successful elimination. The chain of elements: fire — degree of complexity — necessary resources, has not yet been embodied in effective methods and regulatory documents, which gives relevance to this area of research.

Goals and objectives. The purpose of the paper is to build a technology for constructing models of fire ranks based on the use of cluster analysis. The tasks include exploratory data analysis and construction of a stochastic model of fire ranks.

Methods. The study used methods of mathematical statistics and unsupervised machine learning in the variant of cluster analysis.

Results and discussion. The possibility of determining a grid of fire ranks and the corresponding number of allocated vehicles based on processing by cluster analysis methods of a selection of retrospective data is shown. It is shown that the obtained results are very close to the norms of allocation of vehicles for fires in Moscow. The concept of stochastic fire ranks as a more informative model for resource allocation is put forward.

Conclusions. The presented results of solving the problem of identifying a grid of fire ranks using a selection of retrospective data make it possible not only to determine the amount of resources required to eliminate a particular fire, but also make it possible to build adaptive stochastic models of fire ranks that are adequate to the region, industry and other subsets of fire objects.

Keywords: fire suppression; exploratory analysis; cluster analysis; machine learning; probability distribution of vehicle application

For citation: Vilisov V.Ya., Khabibulin R.Sh. Clustering of fires at fuel and energy complex facilities using retrospective statistical data to identify fires ranks. *Pozharovzryvobezopasnost/Fire and Explosion Safety*. 2024; 33(1):83-93. DOI: 10.22227/0869-7493.2024.33.01.83-93 (rus).

✉ Renat Shamilevich Khabibulin, e-mail: kh-r@yandex.ru

Введение

При выделении ресурсов для ликвидации пожара традиционно важным является такой индикатор как ранг пожара, укрупненно определяющий как степень сложности пожара, так и потребность в ресурсах [1–3]. Есть много подходов к его оцениванию, определению, назначению [4–7], и на сегодня нельзя сказать, что вопросы практического его применения окончательно решены и не требуют дальнейших исследований, что свидетельствует об актуальности темы представленной работы. Использование ретроспективных статистических данных о пожарах может позволить выявить закономерности и построить соответствующие модели [1, 8–11], отражающие зависимости ранга пожара от регистрируемых показателей пожара. Особенностью данного исследования является то, что в базах ретроспективных данных ранг пожара не регистрируется.

Анализ публикаций [1, 2, 9, 12] показывает, что существует два подхода к выделению необходимых ресурсов на ликвидацию пожара: без использования понятия ранга пожара и с его учетом. В тех случаях, когда выделяемые ресурсы увязываются с рангом возникшего пожара, ранг определяется в соответствии с одним из двух подходов — нормативным [2], основанным на фундаментальном анализе протекающих процессов, и дескриптивным [1], основанным на анализе ретроспективных данных.

Выделение ресурсов на пожар во многом регламентировано различными правовыми актами, однако они не могут предусмотреть все встречающиеся на практике случаи. А это дает возможность диспетчеру пожарно-спасательной части выделять (или не выделять) дополнительную технику с учетом текущей ситуации в дополнение к принятому расписанию выездов. Таким образом, ресурсы, выделяемые для ликвидации текущего пожара, содержат постоянную

(базовую) составляющую, определяемую рангом и детерминированным расписанием выездов, а также случайную составляющую, обусловленную особенностями текущего пожара. Однако открытым остается вопрос, какая из этих частей пула выделенных ресурсов преобладает и насколько. Если доминирует случайная составляющая, то концепция рангов становится сомнительной. В другом случае — алгоритмизация назначения рангов пожара может служить основой для построения систем поддержки принятия решений (СППР), например, в форме рекомендательных систем [13, 14].

В рамках данного исследования предпринята попытка дать ответ на вопрос, можно ли на основании реальных, зарегистрированных в базах данных (БД), ретроспективных сведений о пожарах составить представление, соответствуют ли реальные пожары тем или иным из общепринятым градациям рангов. Или необходимы, в рамках детерминированной ранговой парадигмы, другие градации пожаров? Или детерминированная парадигма не является адекватной и необходима стохастическая ранговая модель? А может быть, проще отказаться от концепции рангов как показателя уровня сложности пожара при выделении ресурсов на его ликвидацию? В силу того, что ответы на эти вопросы требуют достаточно больших аналитических и отдельных расчетов, в данной работе представлены результаты лишь первого блока исследований — попытки кластеризации исходной выборки данных.

Данные включают сведения о пожарах на объектах топливно-энергетического комплекса (ТЭК), т.е. на объектах электроэнергетики (код 11 по классификатору приказа МЧС России № 625 от 24.12.2018 г.)¹, топливной промышленности (код 20) и угольной про-

¹ О формировании электронных баз данных учета пожаров и их последствий : Приказ МЧС России от 24 декабря 2018 г. № 625.

мышленности (код 27), за период с 2000 по 2020 г. в количестве 3231 записи. Количество полей в каждой записи — 89, структура данных и используемые классификаторы определены приказом¹. Эта группа предприятий обладает той спецификой, что возгорание даже на второстепенных объектах и сооружениях (при риске более широкого распространения пожара) может привести к существенному ущербу.

Предварительный анализ данных

В практике статистического анализа структура этапов анализа данных, с учетом реального состояния анализируемых выборок и возможностей современных программных сред и соответствующих библиотек программ (в частности, *Python*, *AnyLogic*, *Java*, *MS Excel* и др.) [13, 15], обычно включает такие укрупненные этапы, как:

- подготовка данных;
- разведочный анализ данных;
- анализ целевых показателей.

В большинстве прикладных задач, использующих инструменты анализа данных, все поля записей данных отражают значения набора признаков (входных, независимых данных) и целевых показателей, представляющих собой выходные данные (зависимые от входных).

Поскольку анализируемые выборки данных отражают исследуемые явления и/или процессы, то для выявления средствами анализа данных ранее неизвестных закономерностей и/или взаимосвязей в объектах исследования желательно выявить наиболее значимые входные и выходные переменные.

Разведочный анализ (*Exploratory Data Analysis* — *EDA*) нацелен на то, чтобы привести исходную выборку данных к виду, удобному для выявления существующих закономерностей, в частности, путем отсеивания несущественных, малозначимых входных и выходных переменных, отбрасывания неполных (с пропусками) или аномалий, т.е. явно искаженных данных, случайных выбросов и повторов. Обоснованное отбрасывание части входных переменных приводит к такому важному эффекту, как снижение размерности моделей, отражающих взаимосвязи целевых показателей с признаками.

Ретроспективные данные о пожарах, в соответствии с нормативами¹, распределены по группам:

1. Общие сведения.
2. Объект пожара.
3. Последствия пожара.
4. Спасено на пожаре.
5. Развитие и тушение пожара.
6. Силы и средства пожаротушения.
7. Сведения о погибших и травмированных.

Отбраковка записей по причинам выхода параметров за границы нормативных или физически обу-

словленных диапазонов привела к тому, что из общего объема в 3231 запись о пожарах для анализа оставлено 2639 (отбраковано свыше 18 %) для того случая, когда при анализе необходимы значения *всех* полей записи. В тех случаях, когда нужен узкий набор полей, может быть использован и полный (исходный) объем выборки.

Задача оценивания рангов по ретроспективным статистическим данным о пожарах, на взгляд авторов, может быть решена по одной лишь подгруппе ресурсов (здесь — автотехники) из группы 6 (силы и средства пожаротушения), выделяемых на ликвидацию пожаров.

Выполнив основные элементы разведочного анализа (отбраковку) на всем множестве полей, рассмотрим возможность сокращения размерности целевых полей — выделяемой автотехники (по приказу¹ в БД включаются 71 вид автотехники). Для этого за основу возьмем приказ МЧС России по г. Москве² о количественном обеспечении рангов пожаров (табл. 1).

В анализируемой выборке последний тип табл. 1 (код 61) не встречается, поэтому в дальнейшем анализе рассмотрены лишь первые 10 типов автомобилей.

В табл. 2 приведено отличное от нуля количество автомобилей по типам, привлекаемых для ликвидации пожаров.

В строках «Код» выделены полужирным курсивом те коды автотехники, которые входят в состав 10 типов табл. 1. Как видно из табл. 2, не все из них соответствуют максимальному количеству единиц привлекаемой автотехники, но именно они выбраны для исследования, чтобы получаемые результаты кластеризации можно было сравнивать с вариантом назначения рангов по г. Москве, представленным в табл. 1.

Следует отметить, что далеко не все виды автотехники, выделявшиеся для ликвидации пожаров и приведенные в табл. 2, обозначены в табл. 1. Поэтому поясним недостающие виды автотехники, имеющие следующие коды: 29 — штабной автомобиль; 32 — другие непригодные для тушения машины и оборудование; 31 — приспособленная и переоборудованная для тушения техника; 14 — автомобиль насосно-рукавный; 33 — рукавный автомобиль; 24 — коленчатый автоподъемник; 34 — пожарная автолаборатория; 30 — мотопомпа; 26 — автомобиль дымоудаления; 16 — автомобиль порошкового тушения; 47 — аварийно-спасательное оборудование; 20 — пожарный поезд; 18 — пожарный аэродромный автомобиль; 25 — автомобиль

² О введении в действие Расписания выезда подразделений пожарной охраны, территориального пожарно-спасательного гарнизона города Москвы для тушения пожаров и проведения аварийно-спасательных работ : Приказ от 18.09.2017 г. № 559 : ГУ Министерства РФ по делам ГО, ЧС и ликвидации последствий стихийных бедствий по г. Москве.

Таблица 1. Количество пожарной автотехники, выделяемой для ликвидации пожаров по Москве, в зависимости от ранга пожара**Table 1.** The number of fire fighting vehicles allocated to extinguish fires in Moscow, depending on the fire ranks

Код Code	Наименование Name	Ранг пожара Fire rank					
		1	1-бис 1-bis	2	3	4	5
11	Автоцистерна Tank truck	2	4	9	14	19	24
23	Автолестница Ladder truck	0	1	2	3	3	3
27	Автомобиль газодымозащитной службы Gas and smoke protection vehicle	0	1	2	3	3	3
15	Пожарный автомобиль пенного тушения Foam extinguishing fire truck	0	0	1	1	1	1
43	Аварийно-спасательный автомобиль Emergency rescue vehicle	0	0	2	2	2	2
12	Автонасос Car pump	0	0	2	4	6	8
45	Автомобиль медицинской службы (первой помощи) Medical service vehicle (first aid)	0	0	1	1	1	1
28	Автомобиль связи и освещения Vehicle communication and lighting	0	0	1	1	1	1
51	Автомобиль базы газодымозащитной службы Gas and smoke protection service base vehicle	0	0	1	1	1	1
78	Автомобиль тыла (оперативно-спасательный) Rear support vehicle (operational rescue vehicle)	0	0	0	1	1	1
61	Автомобиль пожарный многоцелевой Multi-purpose firefighter vehicle	0	0	1	1	1	1
Всего: / Total:		2	6	22	32	39	46

Таблица 2. Количество единиц автотехники, привлеченной для ликвидации пожаров на объектах топливно-энергетического комплекса за период 2000–2020 гг.**Table 2.** Quantity of vehicles used to extinguish fires at fuel and energy complex facilities for the period 2000–2020

Номер п/п Number p/p	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18
Код Code	11	29	23	32	27	31	14	15	43	33	12	24	45	28	34	30	26	51
Количество Quantity	7650	499	347	102	81	80	62	52	49	46	42	39	28	27	15	15	12	10
Номер п/п Number p/p	19	20	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30	31	32	33	34	35	36
Код Code	16	47	20	18	25	13	42	58	50	49	38	46	17	35	44	78	22	39
Количество Quantity	9	9	6	5	5	5	4	3	3	2	2	2	1	1	1	1	1	1

технической службы; 13 — прицепная насосная станция; 42 — трактор; 58 — пожарно-спасательный автомобиль; 50 — автомобиль с насосом высокого давления; 49 — автоцистерна с лестницей; 38 — водозащитный автомобиль; 46 — спасательные устройства; 17 — автомобиль комбинированного тушения; 35 — автомобиль газового тушения; 44 — пеноподъемник; 22 — пожарный вертолет; 39 — пожарный дымосос.

Кластерный анализ статистических данных о пожарах

Как отмечалось выше, БД содержат лишь фактические данные о пожарах и процессах их ликвидации, в них нет сведений о рангах пожаров. Ранги используются в практике управления реагированием и ликвидацией пожаров как индикаторы для выделения необходимых ресурсов [1–3, 16, 17]. Представленный здесь ретроспективный анализ направлен на то, чтобы показать: можно ли по имеющимся данным говорить о том, что выделявшиеся ресурсы соответствовали некоторым градациям сложности пожаров (а значит и градациям выделенных ресурсов); сколько таких градаций; соответствуют ли эти градации ныне существующим градациям рангов.

Поскольку в каждой записи БД анализируются лишь 10 переменных (10 типов из табл. 1), вся выборка с полным количеством значений полей, составляющая после предварительного отбора 2639 записей, может быть сокращена (за счет удаления дублирующих значений 10 оставшихся полей записей) до 117 уникальных записей (точек в 10-мерном пространстве признаков). Эта короткая выборка и является исходным «сырьем» для дальнейшего кластерного анализа выявления рангов.

Основные задачи кластерного анализа [5, 18, 19] состоят в поиске центров кластеров — центроидов (их координат в пространстве признаков) и в разметке точек выборки [20] путем отнесения их к тому или иному кластеру по критерию минимального расстояния до центроидов.

Формализованное представление задачи кластеризации заключается в следующем [18]. Дано множество объектов ($j = \overline{1, n}$), каждый из которых представлен точкой (вектором) в пространстве признаков:

$$\bar{x}^j = [x_1^j \quad x_2^j \quad \dots \quad x_m^j]^T,$$

где x_i^j — значение i -го признака для j -го объекта; T — символ транспонирования. Найми множество Y примерно однородных групп $y_k \in Y$, по которым распределены объекты $\bar{x}^j$. В результате кластеризации каждый объект исходного множества получит свой индекс привязки к соот-

ветствующему кластеру — $\bar{x}_k^j$. То есть алгоритм кластеризации каждому номеру объекта ставит в соответствие номер кластера: $j \rightarrow k$.

На практике часто используют метод K -средних, в котором критерием является минимизация суммарного евклидова расстояния до центров всех кластеров:

$$V(S_k) = \sum_{k=1}^K \sum_{\bar{x} \in S_k} \sum_{i=1}^m (x_i^j - \bar{\mu}_i^k)^2, \quad (1)$$

где $\bar{\mu}^k = [\mu_1^k \quad \mu_2^k \quad \dots \quad \mu_m^k]^T$ — точка — центр k -го кластера на текущем шаге кластеризации; S_k — множество, состоящее из векторов $\bar{x}^j$, принадлежащих k -му кластеру на текущем шаге кластеризации.

Метод K -средних обычно реализуется в виде следующих шагов [18]:

- шаг 1. Каждая точка исходной выборки приписывается одному из K кластеров (т.е. формируются начальные подмножества S_k);
- шаг 2. Вычисляется центр каждого кластера (векторы $\bar{\mu}^k$) как среднее арифметическое всех точек, входящих в этот кластер (по каждой из координат);
- шаг 3. Вычисляется значение целевого показателя $V(S_k)$ по формуле (1);
- шаг 4. Для каждой точки выборки вычисляется расстояние до центра каждого кластера. Точки приписываются к тем кластерам, расстояние до которых минимально. При этом может измениться состав подмножеств S_k , а значит и расположение центров кластеров $\bar{\mu}^k$;
- шаг 5. Для текущих S_k и $\bar{\mu}^k$ вычисляется значение целевого показателя $V(S_k)$, и если оно меньше предыдущего более чем некоторый заданный порог точности, то процесс кластеризации прекращается, иначе — перейти к шагу 4.

В методе K -средних количество искоемых кластеров должно быть задано априори. Это можно сделать предварительным проведением иерархической кластеризации, в ходе которой и определить желательное количество кластеров, либо можно воспользоваться «методом локтя» [21–23], согласно которому необходимо провести кластеризацию методом K -средних для ряда количества кластеров, а затем в качестве оптимального количества выбрать такое, которое обеспечивает максимальный прирост меры среднего расстояния до центроидов.

Выполненный средствами библиотеки машинного обучения *SciKit-Learn* (на языке программирования *Python*) кластерный анализ методом K -средних для шести кластеров (соответствующих рангам 1, 1-бис, 2, 3, 4, 5) позволил вычислить центроиды с координатами, приведенными в табл. 3.

Таблица 3. Координаты центров шести кластеров, соответствующих рангам пожаров
Table 3. Coordinates of the centers of six clusters corresponding to the fire ranks

Кластер Cluster	Ранг Rank	Автомобили (коды) / Cars (codes)									
		11	23	27	15	43	12	45	28	51	78
4	1	2,091	0,364	0,273	0,091	0,182	0,136	0,091	0	0,182	0
0	1-бис 1-bis	4,968	0,548	0,226	0,290	0,258	0,129	0,065	0,065	0,032	0
5	2	8,154	1,308	0,359	0,051	0,154	0,231	0,231	0	0,103	0,026
3	3	9,200	0,400	0	2,400	0,800	0	0	0	0,200	0
2	4	12,632	1,211	0,211	0,105	0,263	0,368	0	0,053	0,053	0
1	5	20	8	4	0	0	0	0	0	0	0

Следует отметить, что координаты центроидов измеряются в единицах количества автотехники, но в табл. 3 почти все значения дробные, что делает эту таблицу, в отличие от табл. 1, не пригодной для традиционных процедур выделения автотехники по номеру ранга. Округление, выполненное в большую сторону, приводит градации рангов к виду, приведенному в табл. 4 и на рис. 1 (в координатах код 11 — код 23). Здесь округление в большую сторону выполнено в рамках следующей логики: если существует даже незначительная потребность (любые дробные значения координаты) в автотехнике данного вида, то это свидетельствует о ее необходимости для ликвидации пожара. *Такую интерпретацию можно считать одним из вариантов принципа гарантированного результата, используемого в случаях описания системы игровой моделью* (антагонистическими или играми с природой).

На рис. 1 отображены и центроиды, соответствующие рангам пожаров по г. Москве (см. табл. 1)

в координатах типов автотехники с кодами 11 и 23. Следует отметить, что для первых трех рангов центроиды, вычисленные для кластеров и определенные приказом по г. Москве², очень близки или совпадают, не выходя за границы кластеров. Остальные три отличаются, но имеют одинаковые тенденции к росту по мере роста номера ранга пожара. Эти отличия можно, видимо, объяснить существенно меньшим объемом ретроспективных статистических данных о пожарах с высокими рангами. Для меньших рангов объем статистики в БД существенно больший, что, очевидно, и приводит к большему совпадению результатов кластерного анализа и градаций рангов по г. Москве.

Поскольку в ретроспективных данных отсутствуют сведения о рангах, в исследовании были выполнены взаимные парные сравнения распределений вероятностей по рангам пожаров (по соответствующим им кластерам). В качестве первого (базового) было принято распределение рангов пожаров

Таблица 4. Координаты центров шести кластеров, соответствующих рангам пожаров, округленные в большую сторону
Table 4. Coordinates of the centers of six clusters corresponding to the fire ranks, rounded up

Кластер / Cluster	Ранг Rank	Автомобили (коды) / Cars (codes)									
		11	23	27	15	43	12	45	28	51	78
4	1	3	1	1	1	1	1	1	0	1	0
0	1-бис 1-bis	5	1	1	1	1	1	1	1	1	0
5	2	9	2	1	1	1	1	1	0	1	1
3	3	10	1	0	3	1	0	0	0	1	0
2	4	13	2	1	1	1	1	0	1	1	0
1	5	20	8	4	0	0	0	0	0	0	0

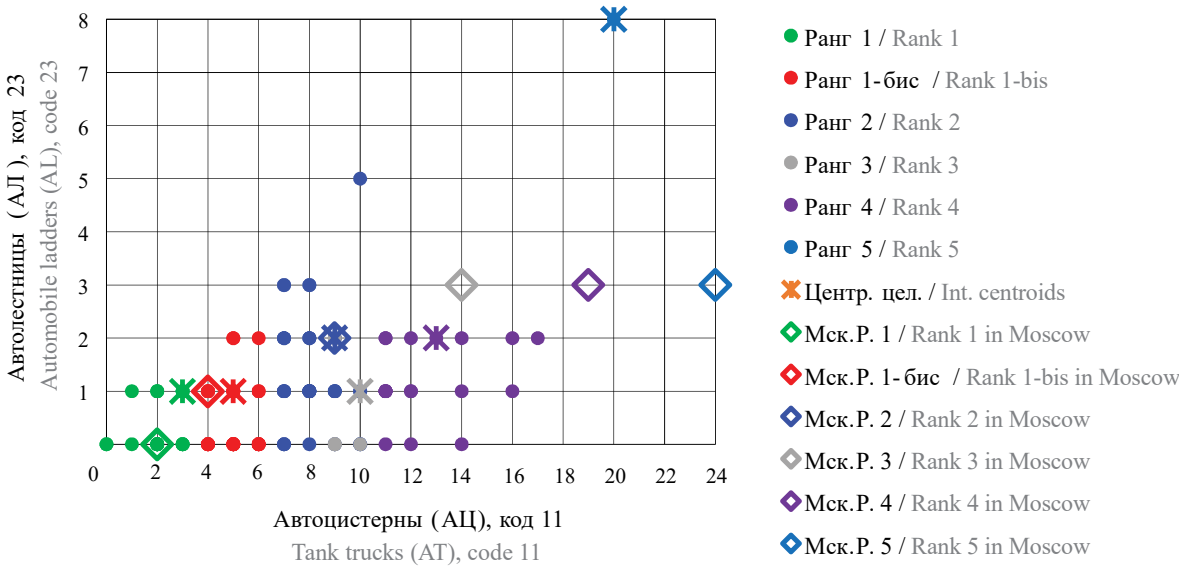


Рис. 1. Кластеры рангов пожаров и их центры, а также ранги по г. Москве в координатах «Автоцистерны – Автолестницы»
Fig. 1. Clusters of fire ranks and their centroids, as well as ranks in Moscow in the coordinates “Tank trucks – Ladder trucks”

в анализируемой выборке (рис. 2, а) при условии, что выделенная автотехника соответствовала рангам приказа² (по метрике расстояния от точки количества автотехники, выделенной на текущий пожар, до аналогичной точки по рангам табл. 1).

Диаграммы вероятностей распределения пожаров по рангам, соответствующим координатам центроидов кластеров, приведены на рис. 2, b; 2, c; 2, d (где 1' — это ранг 1-бис), причем, на рис. 2, b — для неокругленных координат центроидов, на рис. 2, c — для округленных (целочисленных), на рис. 2, d — для округленных в большую сторону.

Вычисление расстояний в шестимерном (по числу рангов) пространстве вероятностей между распределением на рис. 2, а и каждым из трех других дали следующие результаты: 0,054; 0,054; 0,133. Это значит, что использование для анализа и управления таблицы дробных значений рангов (см. табл. 1) и таблицы цело-

численных рангов, полученных обычным округлением до целых значений, эквивалентно.

Таким образом, применение кластерного анализа для идентификации рангов пожаров (в рамках шестиуровневой общепринятой сетки) на основании ретроспективных данных о количестве выделенной автотехники приводит к достаточно адекватным результатам.

Стохастическая модель рангов

Следует отметить, что центроиды кластеров являются детерминированной моделью рангов, как и представленные в Приказе² (табл. 1). В реальной практике к детерминированному расписанию выездов обычно лицами, принимающими решения, добавляются дополнительные единицы и/или виды техники, в некоторых случаях количества могут и уменьшаться. Кроме того, предполагается,

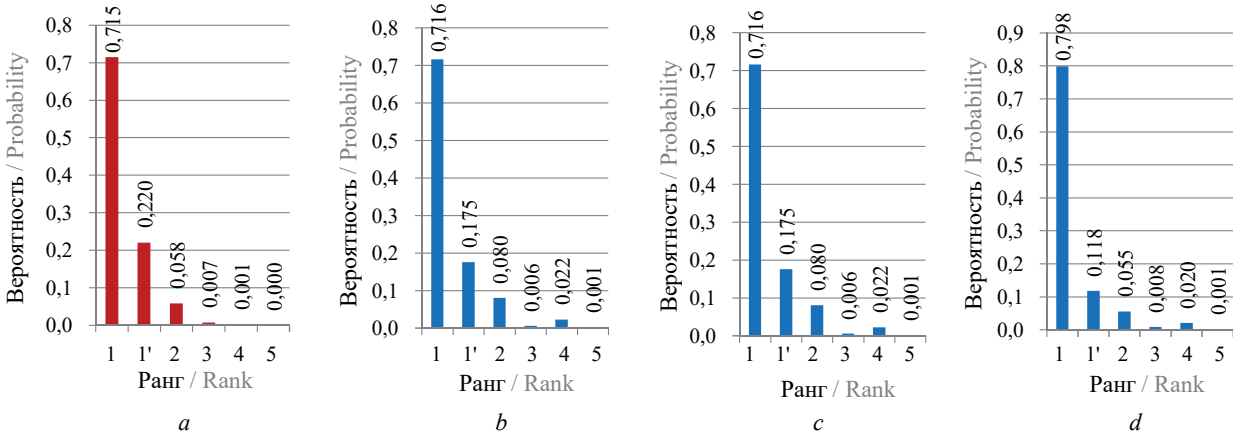


Рис. 2. Распределения вероятностей рангов пожара по выборке
Fig. 2. Probability distributions of the fire ranks according to the selection

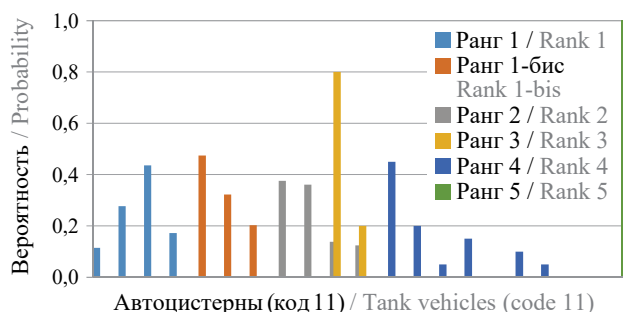


Рис. 3. Гистограммы количества автоцистерн по рангам пожара

Fig. 3. Histograms of the number of tank trucks by the fire ranks

что автотехника, предусмотренная нормативными документами для выезда по разным рангам пожара, имеет полный боевой расчет. Однако часто в действительности боевой расчет составляет 2–3 человека вместо 6, что приводит к необходимости вызова дополнительной автотехники в целях обеспечения требуемой численности личного состава на месте пожара. Таким образом, реальные ранги фактически являются стохастическими объектами, где данные, представленные в расписании выездов, являются, очевидно, средними значениями распределения вероятностей привлечения того или иного количества видов автотехники. С привлечением инструментов кластерного анализа каждый кластер можно считать образом того или иного ранга. Кластер отражает распределение ресурсов, представленное частными распределениями отдельных видов автотехники, как координатами точек кластера в пространстве признаков. Таким образом, при стохастической модели рангов расписание выездов также будет стохастическим, представленным не единственной таблицей (типа табл. 1), а совокупностью таблиц, в простейшем случае — двумя таблицами, где первая — таблица средних значений необходимого количества автотехники по рангам (аналогична табл. 1), а вторая — таблица дисперсий распределения количества автотехники по рангам (при условии аппроксимации распределений одним из законов распределения вероятностей). На рис. 3 приведены в качестве примера гистограммы распределения автоцистерн (код 11, первая из координат точек кластеров), построенные по данным о кластерах, соответствующих своим рангам.

Аналогичные гистограммы (и соответствующие им аналитические аппроксимации) могут быть построены по всем 10 признакам (видам автотехники).

Алгоритмы использования стохастических моделей рангов в практике управления реагированием и ликвидацией пожаров выходят за рамки ограниченного объема данной публикации и будут представлены в следующих работах.

Выводы

Исследование, результаты которого частично представлены в данной работе, показало, что использование инструментов кластерного анализа, как обучение без учителя, на основе выборки ретроспективных статистических данных, позволяет выявить группы пожаров, отождествимых с рангами пожаров.

Предложена концепция стохастических рангов пожаров и механизм их построения на основе использования методов кластерного анализа ретроспективных статистических данных о пожарах. Достоинствами такой модели рангов являются:

- ее большая информативность за счет того, что ранг представлен не точкой в пространстве признаков, а распределением вероятностей, что позволяет этот инструмент использовать более эффективно, например, используя в расписании выездов не средние значения распределений, а квантильные оценки, соответствующие требуемому гарантированному уровню доверительной вероятности;
- для обеспечения большей адекватности стохастической модели рангов пожаров линейка рангов должна строиться гибко: по подвыборке (из общей БД) статистических данных региона, отрасли и степени необходимой детализации (локальной сетки рангов);
- для обеспечения актуальности стохастической модели рангов пожаров она должна регулярно обновляться по мере роста базы ретроспективных данных.

Предложенный подход к назначению рангов пожаров дает аргументированную методологическую основу для формирования нормативных документов о рангах пожаров и соответствующих алгоритмов для компьютерных систем поддержки принятия решений.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Топольский Н.Г., Вилисов В.Я. Методы, модели и алгоритмы в системах безопасности: машинное обучение, робототехника, страхование, риски, контроль. М. : РИОР, 2021. 475 с. DOI: 10.29039/02072-2
2. Топольский Н.Г., Прус Ю.В., Климовцов В.М. Определение ранга пожара на объекте по диаграммам состояния // Системы безопасности. СБ-2004 : мат. 13-й межд. конф. М. : Академия ГПС МЧС России, 2004. С. 297–299.

3. Топольский Н.Г., Бутузов С.Ю., Вилисов В.Я. Информационно-аналитические модели поддержки управления при ликвидации пожаров и чрезвычайных ситуаций. М. : АГПС МЧС России, 2021. 216 с.
4. Вилисов В.Я., Хабибуллин Р.Ш. Применение методов планирования эксперимента в экспертных процедурах для машинного обучения модели распределения ресурсов при ликвидации пожара // Технологии техносферной безопасности. 2023. Вып. 1 (99). С. 44–63. DOI: 10.25257/TTS.2023.1.99.44-63
5. Хабибуллин Р.Ш. Кластерный анализ в области предупреждения и ликвидации пожаров и чрезвычайных ситуаций // Технологии техносферной безопасности. 2022. Вып. 3 (97). С. 202–214. DOI: 10.25257/TTS.2022.3.97.202-214
6. Вилисов В.Я., Хабибуллин Р.Ш. Статистический анализ и моделирование данных о ликвидации пожаров на топливно-энергетических предприятиях // Пожары и чрезвычайные ситуации: предупреждение, ликвидация. 2023. № 3. С. 63–74. DOI: 10.25257/FE.2023.3.63-74
7. Stroh R., Bect J., Demeyer S., Fischer N., Vazquez E. Gaussian process modeling for stochastic multi-fidelity simulators, with application to fire safety. 2016. DOI: 10.48550/arXiv.1605.02561
8. Lee H.-R., Lee T. Multi-agent reinforcement learning algorithm to solve a partially-observable multi-agent problem in disaster response // European Journal of Operational Research. 2021. Vol. 291. Issue 1. P. 296–308. DOI: 10.1016/j.ejor.2020.09.018
9. Бедило М.В., Бутузов С.Ю., Прус Ю.В., Рыженко А.А., Чурсин Р.Г. Модель адаптивного управления оперативными службами РСЧС в чрезвычайных ситуациях межрегионального и федерального уровня // Технологии техносферной безопасности. 2017. № 1 (71). URL: <http://agps-2006.narod.ru/ttb/2017-3/44-01-17.ttb.pdf>
10. Hamke E.E., Jordan R., Ramon-Martinez M. Breath Activity Detection Algorithm. 2016. DOI: 10.48550/arXiv.1602.07767
11. Zhang X., Mahadevan S. Bayesian neural networks for flight trajectory prediction and safety assessment // Decision Support Systems. 2020. Vol. 131. DOI: 10.1016/j.dss.2020.113246
12. Власов К.С., Порошин А.А. Исследование региональных особенностей параметров крупных пожаров // Технологии техносферной безопасности. 2022. Вып. 2 (96). С. 82–91. DOI: 10.25257/TTS.2022.2.96.82-91
13. Николенко С., Кадурин А., Архангельская Е. Глубокое обучение. Погружение в мир нейронных сетей. СПб. : Питер, 2018. 480 с.
14. Хайкин С. Нейронные сети: полный курс. М. : Изд. Вильямс, 2006. 1104 с.
15. Pedregosa F., Varoquaux G., Gramfort A., Michel V. et al. SciKit-Learn. Machine learning in Python // Journal of Machine Learning Research. 2011. No. 12. Pp. 2825–2830.
16. Fertier A., Barthe-Delanoë A.-M., Montarnal A., Truptil S., Bénaben F. A new emergency decision support system: the automatic interpretation and contextualisation of events to model a crisis situation in real-time // Decision Support Systems. 2020. Vol. 133. DOI: 10.1016/j.dss.2020.113260
17. Cavdur F., Sebatli A. A decision support tool for allocating temporary-disaster-response facilities // Decision Support Systems. 2019. Vol. 127. DOI: 10.1016/j.dss.2019.113145
18. Дюран Б., Оддел М. Кластерный анализ. М. : Статистика, 1977. 127 с.
19. Пранов Б.М. Вопросы применения кластерного анализа в пожарной статистике // Технологии техносферной безопасности. 2021. Вып. 4 (94). С. 117–124. DOI: 10.25257/TTS.2021.4.94.117-124
20. Пожары и пожарная безопасность в 2019 году // Статистика пожаров и их последствий : стат. сб. / под общ. ред. Д.М. Гордиенко. М. : ВНИИПО МЧС России, 2020. 80 с.
21. Zhang T., Wang Z., Wong H.Y., Tam W.Ch., Huang X., Xiao F. Real-time forecast of compartment fire and flashover based on deep learning // Fire Safety Journal. 2022. Vol. 130. P. 103579. DOI: 10.1016/j.firesaf.2022.103579
22. Nguyen H.T., Abu-Zidan Y., Zhang G., Nguyen K.T.Q. Machine learning-based surrogate model for calibrating fire source properties in FDS models of facade fire tests // Fire Safety Journal. 2022. Vol. 130. P. 103591. DOI: 10.1016/j.firesaf.2022.103591
23. Gulyamova G.M. et al. About methods of decrease in fire hazard at gas stations // International Academy Journal Web of Scholar. 2019. Vol. 1. Issue 1 (31). Pp. 8–10. DOI: 10.31435/rsglobal_wos/31012019/6306

REFERENCES

1. Topolskiy N.G., Vilisov V.Ya. *Methods, models and algorithms in security systems: machine learning, robotics, insurance, risks, control*. Moscow, RIOR Publ., 2021; 475. DOI: 10.29039/02072-2 (rus).
2. Topolskiy N.G., Prus Yu.V., Klimovtsov V.M. Determining the rank of fire at a facility using state diagrams. *Materials of the 13th international conference "Security Systems" SB-2004*. Moscow, State Fire Service Academy EMERCOM of Russia, 2004; 297-299. (rus).

3. Topolskiy N.G., Butuzov S.Yu., Vilisov V.Ya. *Information and analytical models of management support in the elimination of fires and emergencies*. Moscow, State Fire Service Academy EMERCOM of Russia, 2021; 216. (rus).
4. Vilisov V.Ya., Khabibulin R.Sh. Application of experimental planning methods in expert procedures for machine learning of a resource distribution model during fire extinguishing. *Technology of Technosphere Safety*. 2023; 1(99):44-63. DOI: 10.25257/TTS.2023.1.99.44-63 (rus).
5. Khabibulin R.Sh. Cluster analysis in the field of prevention and response to fires and emergencies. *Technology of Technosphere Safety*, 2022; 3(97):202-214. DOI: 10.25257/TTS.2022.3.97.202-214 (rus).
6. Vilisov V.Ya., Khabibulin R.Sh. Statistical analysis and modeling data on eliminating fires at fuel and energy enterprises. *Fire and emergencies: prevention, elimination*. 2023; 3:63-74. DOI: 10.25257/FE.2023.3.63-74 (rus).
7. Stroh R., Bect J., Demeyer S., Fischer N., Vazquez E. *Gaussian process modeling for stochastic multi-fidelity simulators, with application to fire safety*. 2016. DOI: 10.48550/arXiv.1605.02561
8. Lee H.-R., Lee T. Multi-agent reinforcement learning algorithm to solve a partially-observable multi-agent problem in disaster response. *European Journal of Operational Research*. 2021; 291(1):296-308. DOI: 10.1016/j.ejor.2020.09.018
9. Bedilo M.V., Butuzov S.Yu., Prus Yu.V., Ryzhenko A.A., Chursin R.G. Model of adaptive management of emergency services of the RSChS in emergency situations at the interregional and federal levels. *Technology of Technosphere Safety*. 2017; 1(71). URL: <http://agps-2006.narod.ru/ttb/2017-3/44-01-17.ttb.pdf> (rus).
10. Hamke E.E., Jordan R., Ramon-Martinez M. *Breath activity detection algorithm*. 2016. DOI: 10.48550/arXiv.1602.07767
11. Zhang X., Mahadevan S. Bayesian neural networks for flight trajectory prediction and safety assessment. *Decision Support Systems*. 2020; 131. DOI: 10.1016/j.dss.2020.11324612.
12. Vlasov K.S., Poroshin A.A. Study of regional characteristics of the parameters of large fires. *Technology of Technosphere Safety*. 2022; 2(96):82-91. DOI: 10.25257/TTS.2022.2.96.82-91 (rus).
13. Nikolenko S., Kadurin A., Arkhangelskaya E. Deep learning. *Dive into the world of neural networks*. St. Petersburg, Piter publ., 2018; 480. (rus).
14. Khaykin S. *Neural networks: a complete course*. Moscow, Williams Publ., 2006; 1104. (rus).
15. Pedregosa F., Varoquaux G., Gramfort A., Michel V. et al. SciKit-Learn. Machine learning in Python. *Journal of Machine Learning Research*. 2011; 12:2825-2830.
16. Fertier A., Barthe-Delanoë A.-M., Montarnal A., Truptil S., Bénaben F. A new emergency decision support system: the automatic interpretation and contextualisation of events to model a crisis situation in real-time. *Decision Support Systems*. 2020; 133. DOI: 10.1016/j.dss.2020.113260
17. Cavdur F., Sebatli A. A decision support tool for allocating temporary-disaster-response facilities. *Decision Support Systems*. 2019; 127. DOI: 10.1016/j.dss.2019.113145
18. Dyuran B., Odell P. *Cluster analysis*. Moscow, Statistics Publ., 1977; 127. (rus).
19. Pranov B.M. Issues of application of cluster analysis in fire statistics. *Technology of Technosphere Safety*. 2021; 4(94):117-124. DOI: 10.25257/TTS.2021.4.94.117-124 (rus).
20. Fires and fire safety in 2019. *Statistics of fires and their consequences : statistical collection*. D.M. Gordienko (rus. ed.). Moscow, VNIPO MChS Rossii, 2020; 80. (rus).
21. Zhang T., Wang Z., Wong H.Y., Tam W.Ch., Huang X., Xiao F. Real-time forecast of compartment fire and flashover based on deep learning. *Fire Safety Journal*. 2022; 130:103579. DOI: 10.1016/j.firesaf.2022.103579
22. Nguyen H.T., Abu-Zidan Y., Zhang G., Nguyen K.T.Q. Machine learning-based surrogate model for calibrating fire source properties in FDS models of facade fire tests. *Fire Safety Journal*. 2022; 130:103591. DOI: 10.1016/j.firesaf.2022.103591
23. Gulyamova G.M. About methods of decrease in fire hazard at gas stations. *International Academy Journal Web of Scholar*. 2019; 1(1):8-10. DOI: 10.31435/rsglobal_wos/31012019/6306

Поступила 06.11.2023, после доработки 30.11.2023;

принята к публикации 12.12.2023

Received November 6, 2023; Received in revised form November 30, 2023;

Accepted December 12, 2023

Информация об авторах

ВИЛИСОВ Валерий Яковлевич, д-р техн. наук, д-р эконом. наук, профессор кафедры прикладной математики, информатики и вычислительной техники, МГТУ им. Н.Э. Баумана (Мытищинский филиал), Россия, 141005, Московская обл., г. Мытищи, ул. 1-я Институтская, 1; РИНЦ ID: 521423; Scopus AuthorID: 57205441277; ResearcherID: P-1650-2019; ORCID: 0000-0002-2612-8593; e-mail: vvib@yandex.ru

ХАБИБУЛИН Ренат Шамильевич, канд. техн. наук, доцент, начальник учебно-научного комплекса автоматизированных систем и информационных технологий, Академия Государственной противопожарной службы Министерства Российской Федерации по делам гражданской обороны, чрезвычайным ситуациям и ликвидации последствий стихийных бедствий, Россия, 129366, г. Москва, ул. Бориса Галужкина, 4; РИНЦ ID: 637284; Scopus Author ID: 6506192400; ResearcherID: A-4261-2016; ORCID: 0000-0003-1816-1665; e-mail: kh-r@yandex.ru

Вклад авторов: *все авторы сделали эквивалентный вклад в подготовку публикации.*
Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Information about the authors

Valeriy Ya. VILISOV, Dr. Sci. (Eng.), Dr. Sci. (Econom.), Professor of Department of Applied Mathematics, Informatics and Computer Technology, MSTU im. N.E. Bauman (Mytishchi branch), 1st Institutskaya St., 1, Moscow Region, Mytishchi, 141005, Russian Federation; ID RSCI: 521423; Scopus AuthorID: 57205441277; ResearcherID: P-1650-2019; ORCID: 0000-0002-2612-8593; e-mail: vvib@yandex.ru, vvib@yandex.ru

Renat Sh. KHABIBULIN, Cand. Sci. (Eng.), Docent, Head of Educational and Scientific Complex of Automated Systems and Information Technologies, the State Fire Academy of the Ministry of Russian Federation for Civil Defense, Emergencies and Elimination on Consequences of Natural Disasters, Borisa Galushkina St., 4, Moscow, 129366, Russian Federation; ID RSCI: 637284; Scopus Author ID: 6506192400; ResearcherID: A-4261-2016; ORCID: 0000-0003-1816-1665; e-mail: kh-r@yandex.ru

Contribution of the authors: *the authors contributed equally to this article.*
The authors declare no conflicts of interests.

ПОЖАРОВЗРЫВБЕЗОПАСНОСТЬ/FIRE AND EXPLOSION SAFETY. 2024. Т. 33. № 1. С. 94–99
POZHAROVZRYVOBEZOPASNOST/FIRE AND EXPLOSION SAFETY. 2024; 33(1):94-99

УДК 614.84

<https://doi.org/10.22227/0869-7493.2024.33.01.94-99>

Оценка пожарного риска на автостоянках с наличием мест для зарядки электромобилей

Александр Сергеевич Харламенков ✉

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

АННОТАЦИЯ

Представлены обобщенные данные о пожарах в мире с участием электромобилей. Рассмотрены некоторые примеры развития пожароопасной ситуации при пользовании зарядными станциями без встроенных систем защиты. Показан метод оценки пожарного риска в закрытых наземных и подземных автостоянках с наличием парковочных мест для подзарядки электромобилей. Даны разъяснения по особенностям предупреждения и тушения пожара с участием электромобиля или зарядной станции. Разобран один из примеров выполнения оценки пожарного риска на основе индексного метода ERIC с указанием мер по устранению и смягчению последствий возможного пожара на рассматриваемых видах автостоянок.

Ключевые слова: батарея; вероятность; пожарная сигнализация; пожаротушение; оповещение; эвакуация; пожарный извещатель; вентиляция; огнестойкость

Для цитирования: Харламенков А.С. Оценка пожарного риска на автостоянках с наличием мест для зарядки электромобилей // Пожаровзрывобезопасность/Fire and Explosion Safety. 2023. Т. 33. № 1. С. 94–99. DOI: 10.22227/0869-7493.2024.33.01.94-99

✉ Харламенков Александр Сергеевич, e-mail: h_a_s@live.ru

Fire risk assessment in car parks with electric vehicle charging facilities

Aleksandr S. Kharlamenkov ✉

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

ABSTRACT

Generalized data on fires in the world involving electric vehicles are presented. Some examples of fire hazardous situation development when using charging stations without inbuilt protection systems are considered. A method of fire risk assessment in enclosed surface and underground car parks with the availability of parking spaces for charging electric vehicles is shown. Explanations on the peculiarities of preventing and extinguishing fires involving an electric vehicle or charging station are given. One of the examples of performing a fire risk assessment based on the ERIC index method is analyzed with the indication of measures to eliminate and mitigate the consequences of a possible fire in the types of car parks under consideration.

Keywords: battery; probability; fire alarm; fire extinguishing; warning; evacuation; fire detector; ventilation; fire resistance

For citation: Kharlamenkov A.S. Fire risk assessment in car parks with electric vehicle charging facilities. *Pozharovzryvobezopasnost/Fire and Explosion Safety*. 2024; 33(1):94-99. DOI: 10.22227/0869-7493.2024.33.01.94-99 (rus.).

✉ Aleksandr Sergeevich Kharlamenkov, e-mail: h_a_s@live.ru



ВОПРОС

В рубрике «Вопрос – ответ» журнала № 6 за 2023 г. [1] были рассмотрены требования пожарной безопасности, предъявляемые к местам парковки и зарядки электромобилей. С учетом утвержденной Стратегии развития автомобильной промышленно-

сти РФ¹ и активного внедрения дополнительных мер поддержки развития электротранспорта² можно

¹ Стратегия развития автомобильной промышленности Российской Федерации до 2035 года : утв. распоряжением Правительства РФ от 28 декабря 2022 г. № 4261-р.

² Официальный сайт Правительства России. URL: <http://government.ru/news/48386>

ожидать постепенного роста числа электромобилей и мест для их зарядки.

Принято считать, что пожары электромобилей — явление редкое, составляющее до 1 % от общего числа пожаров с участием транспортных средств с другими типами двигателей³. По ориентировочным оценкам, проведенным с 2010 по 2023 г., наблюдается постепенный рост числа пожаров с участием электромобилей. По исследованиям организации «EV FireSafe»⁴, по состоянию на июль 2023 г. 25 % пожаров было зафиксировано в подземных и крытых помещениях, 31 % — на открытых парковках и 29 % — при движении по дороге (остальные 15 % — место пожара не известно).

В период с 2010 по 2023 г. число возгораний тяговых батарей электромобилей по причине теплового разгона при их подключении к ЭЗС переменного или постоянного тока находилось в диапазоне 18–32 % от общего числа пожаров. При этом из-за неисправности ЭЗС, зарядного кабеля и нарушений в электросетях зданий и сооружений произошло немногим более 1 % пожаров, в остальных случаях основной причиной пожара при подзарядке электромобиля считается наличие заводской неисправности в его батарее или внешнего теплового воздействия на батарею (пожар в здании). В ближайшем будущем следует ожидать увеличения числа пожаров электромобилей не только из-за роста продаж новых, но и активной эксплуатации подержанных моделей.

Вступившие в силу изменения к СП 113.13330.2023⁵ позволили размещать зарядные станции для электромобилей (ЭЗС) не только на открытых парковках, но и подземных автостоянках с возможностью использования ЭЗС с номинальным током до 32А (1 и 2-й типы) ниже первого подземного этажа паркинга. Такое положение дел указывает на необходимость проведения дополнительного анализа и оценки возможных негативных последствий в случае пожара с участием электромобиля или самой ЭЗС.

Существуют ли общие подходы к оценке риска и выбора мер по снижению опасности возгорания электромобилей на крытых наземных и подземных парковках?

ОТВЕТ

Для начала рассмотрим один из возможных вариантов поражения человека электрическим током и развития пожароопасной ситуации в случае зарядки электромобиля от переносной (портативной) ЭЗС 1 или 2-го типа. Такие ЭЗС подключаются к штатным однофазным или трехфазным розеткам, проложенным к месту парковки от распределительного электрического щита (ЩР).

³ Impact of BEV Adoption on the Repair and Insurance Sectors. Final Report. Thattham Insurance Research Department, 2022. URL: <https://www.thatcham.org/>

⁴ Официальный сайт организации EV FireSafe. Исследование пожаров на электромобилях. URL: <https://www.evfiresafe.com/research-ev-fire-charging>

⁵ СП 113.13330.2023. Свод правил. Стоянки автомобилей «СНиП 21-02–99*»: Приказ Минстроя России от 05.10.2023 № 718/пр, введен в действие 05.11.2023 г.

По требованиям СП 113.13330.2023⁵ процесс подзарядки электромобилей должен быть безопасным. Это достигается путем контроля состояния изоляции, температурных режимов, протекающего зарядного тока и т.д. В Приложении В к ГОСТ Р МЭК 61851-1⁶ представлены типовые варианты схем подключения электромобиля к ЭЗС всех 4 типов, где в обязательном порядке должно применяться устройство защитного отключения (УЗО или УДТ) для защиты от токов утечки на землю (дифференциальных токов). Многие производители переносных ЭЗС 1 и 2-го типов для снижения стоимости конечного продукта не размещают УДТ в блоке управления своих станций, а указывают в инструкциях, что данная защитная функция должна возлагаться на УДТ, установленные в ЩР. Если в процессе подзарядки возникнет утечка тока в электрической цепи электромобиля, то штатные УДТ (тип А и АС) в ЩР могут не среагировать на данное нарушение, т.к. рассчитаны обычно на утечку переменного тока, а для защиты от утечки выпрямленного тока следует использовать УДТ типа В, которое стоит намного дороже вышеуказанных типов и в ЩР не устанавливается. При отсутствии УДТ типа В вся надежда по предотвращению развития пожароопасной ситуации и защите человека будет возложена на платы управления самого электромобиля. В лучшем случае отключится или выйдет из строя только блок управления переносной ЭЗС, а в худшем — пожар в электромобиле. По этой причине использование переносных ЭЗС 1-го типа запрещено во многих странах, но из-за удобства продолжает применяться водителями электромобилей. Ведь намного проще найти розетку и подключиться к ней, чем стационарно установленную ЭЗС. Данное обстоятельство способствует повышению вероятности возникновения пожароопасной ситуации, особенно на уже действующих крытых наземных и подземных парковках, где ранее не были реализованы технические решения по организации мест зарядки электромобилей.

Таким образом, при проектировании мест для зарядки электромобилей следует выполнять оценку пожарных рисков с целью эффективного контроля и реагирования на них.

Один из подходов к оценке риска представлен в Руководстве по пожарной безопасности для электромобилей на крытых автостоянках (Великобритания) [2], разработанном на базе индексного метода оценки пожарного риска ERIC [3] и международного стандарта BS PAS 79-1-2020⁷ (Оценка пожарного риска). Руководство [2] позволяет выработать определенные технические и организационные меры, обеспечивающие необходимую степень защищенности людей и имущества на объектах,

⁶ ГОСТ Р МЭК 61851-1. Система токопроводящей зарядки электромобилей. Часть 1. Общие требования : введен в действие 1 сентября 2014 г. М. : Стандартинформ, 2014.

⁷ British Standards Institution (BSI) BS PAS 79-1-2020. Fire risk assessment — Part 1: Premises other than housing Code of practice. 2020. URL: <https://knowledge.bsigroup.com/products/fire-risk-assessment-premises-other-than-housing-code-of-practice?version=standard>



Иерархия мер по смягчению последствий пожара электромобиля или ЭЗС

оборудованных зарядной инфраструктурой. В первую очередь метод пригоден для получения относительных оценок и сравнения однотипных объектов по степени пожарного риска. В документе изложены меры по смягчению последствий воздействия пожара с участием электромобиля или ЭЗС.

Метод оценки пожарного риска ERIC основан на применении системы для управления рисками (иерархия мер). Это пошаговый подход к устранению или снижению рисков, где используется выстраивание мер по управлению рисками от самого высокого (эффективного), надежного уровня защиты до самого низкого и наименее надежного уровня (см. рисунок). Иерархия состоит из следующих уровней защиты: устранение *E*; сокращение *R*; изолирование *I*; контроль *C*.

Наиболее эффективными являются меры, которые позволяют устранить риск, а наименее эффективными — которые используют различные инструкции или процедуры управления, требующие специальной подготовки персонала, а также дополнительного оборудования для обеспечения безопасности.

В зависимости от того, на какой стадии выполняется оборудование мест парковки с ЭЗС (в уже существующем или новом здании), могут использоваться различные меры по снижению вероятности возникновения пожара и снижению его последствий. К ним относятся меры по внесению изменений в системах автоматического пожаротушения, пожарной сигнализации, оповещения и управления эвакуацией людей при пожаре, дымоудаления, а также повышение степени огнестойкости конструкций, увеличение объемов огнетушащих веществ, изменение путей эвакуации и т.д.

В табл. 1 представлены меры, направленные на снижение риска возникновения пожара, гибели людей и потери имущества на крытых парковках, оборудованных местами зарядки электромобилей [2]. Меры распределены в порядке снижения их эффективности.

Хотя многие из перечисленных в таблице мер уже реализуются по СП 113.13330.2023⁵, но некоторые из них требуют дополнительного рассмотрения и анализа. Например, известно, что тушение пожара при горении тяговой аккумуляторной батареи электромобиля занимает намного больше времени и может достигать нескольких часов [4]. Данное обстоятельство должно учитываться при выборе пределов огнестойкости строительных конструкций в местах зарядки электромобилей.

Так как при тушении рассматриваемого пожара следует ожидать более длительного выделения токсичных продуктов горения и дыма, то этот фактор нужно учитывать при проектировании системы дымоудаления и времени ее работы.

Обычно возгорание электромобиля начинается с активного выделения газов из внутреннего пространства тяговой батареи через предохранительные клапаны, а в месте поврежденной ячейки аккумулятора наблюдается активный рост температуры из-за теплового разгона [5]. Поэтому своевременное обнаружение утечки газов и чрезмерного нагрева корпуса электромобиля с последующим отключением питания ЭЗС и передачей сигнала на пост охраны позволит сократить время реагирования на пожар и снизить ущерб. Отключение ЭЗС может быть реализовано с помощью дополнительной локальной установки в местах парковки электромобилей дымовых и (или) тепловых пожарных извещателей (в том числе тепловизионных камер

Таблица 1. Меры по устранению и смягчению последствий пожара электромобиля или ЭЗС в зависимости от степени их эффективности

Мера снижения риска	Уровни снижения риска			
	E	R	I	C
Обесточивание ЭЗС при обнаружении неисправности, повреждении ЭЗС, зарядного кабеля или заряжаемой батареи	+			
Использование только официально утвержденных точек зарядки электромобилей (ЭЗС), имеющих аппараты защиты, систему оповещения (сигнализации) о неисправности и т.д.		+		
Применение ЭЗС 3 и 4-го типа, имеющих встроенный интерфейс для мониторинга неисправностей (защиту от токовой перегрузки, датчики наклона, отправка отчетов о повреждениях/неисправностях, датчики температуры, включения вентиляции и т.п.)		+		
Проведение регулярного технического обслуживания пунктов зарядки, а также применение ЭЗС, имеющих различные внутренние системы оповещения о повреждениях/неисправностях (датчики наклона, температуры и т.п.)		+		
Установка ЭЗС только специалистами (электриками), имеющими соответствующую квалификацию и разрешения (допуск к выполнению работ)		+		
Защита ЭЗС от механических повреждений с помощью барьеров, ограничителей, предупреждающих знаков и т.п.		+		
Обеспечение подключения зарядного кабеля к электромобилю по кратчайшему расстоянию в пространстве и возвращения его на исходное место		+		
Применение неотделяемых зарядных кабелей, совмещенных с конструкцией ЭЗС, расположенных в местах, где максимально исключено их повреждение от людей или транспорта (частое наступание, наезд колесами и т.п.)		+		
Увеличение расстояния между автомобилями или увеличение габаритных мест, оборудованных ЭЗС		+		
Контроль скорости движения автомобилей на автостоянке для исключения столкновений		+		
Обеспечение удобной и безопасной планировки пространства автостоянки, снижающей вероятность столкновений		+		
Отделение мест зарядки электромобилей огнестойкими конструкциями для исключения распространения огня на другие транспортные средства		+		
Повышение пределов огнестойкости строительных конструкций проектируемой парковки с местами для зарядки электромобилей		+		
Удаление мест ЭЗС от путей эвакуации с обеспечением доступа пожарных подразделений в случае пожара		+		
Использование системы оповещения и эвакуации людей при пожаре на крытой автостоянке		+		
Использование системы пожаротушения в случае пожара ЭЗС или электромобиля		+		
Обеспечение достаточного запаса воды для пожаротушения и возможности ее подачи на тушение пожара		+		
Безопасное хранение электромобилей отдельно от других транспортных средств (на специально оборудованных для этого местах)			+	
Использование дополнительных систем безопасности (например, тепловизионные камеры, тепловые пожарные извещатели) и подключение их к существующим системам автоматического пожаротушения (АУПТ) и пожарной сигнализации (АПС)			+	
Использование дополнительных систем безопасности для защиты ЭЗС от вандализма (например, камеры видеонаблюдения, охранный сигнализация)			+	
Наличие в местах зарядки электромобилей АПС			+	
Автоматическое отключение электроснабжения ЭЗС при сработке систем пожарной сигнализации или пожаротушения			+	
Увеличение расстояний между проектируемой крытой парковки и другими зданиями			+	
Обеспечение ограниченного распространения потенциально возможного пожара с участием электромобиля по внешнему фасаду здания и его отделочным материалам			+	
Обеспечение возможности безопасной эвакуации неисправного или сгоревшего электромобиля с территории парковки с учетом габаритных размеров проездов			+	

Мера снижения риска	Уровни снижения риска			
	E	R	I	C
Обеспечение наличия дополнительного ручного отключения электроснабжения ЭЭС в местах зарядки электромобилей				+
Наличие первичных средств пожаротушения (огнетушители, противопожарное полотно) в местах зарядки электромобилей				+
Использование системы противодымной вентиляции с повышенными характеристиками воздухообмена				+
Повышение пределов огнестойкости ограждающих конструкции мест с ЭЭС для эксплуатируемых парковок				+
Поддержание в надлежащем состоянии путей эвакуации, аварийного освещения, знаков безопасности и сигнальной разметки при организации парковочных мест с ЭЭС				+
Обеспечение контроля стока вод, используемых в пожаротушении электромобилей для уменьшения экологического ущерба				+
Разработка (переработка) карточек и планов тушения пожара на парковках, оборудованных ЭЭС				+

и др.), связанных с системой питания ЭЭС и системами АПС и АУПТ для выполнения п. 7.10.14 СП 113.13330.2023⁵, согласно которому ЭЭС должны обесточиваться при срабатывании АПС и (или) АУПТ. Кроме того, на данной стадии развития пожара следует рассмотреть варианты экстренной эвакуации неисправного электромобиля за пределы крытой парковки в безопасную зону.

Проведенные исследования показывают, что вода, которая применялась для тушения электромобилей, содержит высокие концентрации загрязняющих веществ, превышающих безопасный уровень для сброса в окружающую среду или канализацию. Поэтому следует дополнительно рассмотреть вопрос о вариантах откачки загрязненной воды из приемных емкостей или ее перекачку на очистные сооружения для ограничения ущерба окружающей среде.

В Руководстве [2] описывается процесс проведения оценки риска с использованием матрицы «вероятность/последствие» по стандарту BS PAS 79-1⁷ для отдельно стоящей наземной четырехэтажной автостоянки (160 парковочных мест, максимальной вместимостью 320 человек). Вероятность возникновения пожароопасной ситуации разделяется на:

- низкую — возникновение пожароопасной ситуации маловероятно из-за незначительного количества потенциальных источников зажигания;
- среднюю — возникновение пожароопасной ситуации имеет место из-за наличия потенциальных источников зажигания (требуется соблюдение стандартных мер контроля за состоянием пожарной безопасности);
- высокую — возникновение пожарной опасности наиболее вероятно из-за наличия потенциальных источников зажигания по причине отсутствия достаточных мер контроля (требуется выполнение дополнительных мер по обеспечению пожарной безопасности).

Последствия в случае возникновения пожароопасной ситуации аналогично разделяются на:

- незначительные — пожар не приведет к серьезным травмам или смерти людей;
- умеренные — пожар может привести к травмам (в том числе серьезным) одного или нескольких человек без смертельного исхода;
- критические — пожар может привести к серьезным травмам или смерти одного или нескольких человек.

Далее строится матрица рисков, представленная в табл. 2. На основании матрицы из табл. 2 выполняется ранжирование уровней рисков и мер, необходимых для контроля и снижения опасности (см. табл. 3).

Таким образом, при рассмотрении различных сценариев развития пожара можно оценить вероятность его возникновения, ожидаемые последствия и принять ряд необходимых мер, снижающих пожарную опасность объекта.

В качестве одного из возможных сценариев может стать воспламенение тяговой батареи в результате теплового разгона с последующим распространением огня на весь электромобиль и перехода пламени на рядом стоящие транспортные средства. Длительное воздействие пламени на строительные конструкции при тушении пожа-

Таблица 2. Матрица рисков «вероятность/последствие»

Вероятность	Последствие		
	Незначительное	Умеренное	Критическое
Низкая	Обычный риск	Допустимый риск	Умеренный риск
Средняя	Допустимый риск	Умеренный риск	Существенный риск
Высокая	Умеренный риск	Существенный риск	Недопустимый риск

Таблица 3. Характеристики различных уровней рисков

Уровень риска	Характеристика риска
Обычный	Никаких дополнительных действий по снижению пожарной опасности не требуется
Допустимый	Требуется незначительное усовершенствование существующих мер контроля за состоянием пожарной безопасности (требуются небольшие затраты)
Умеренный	Требуется принять дополнительные меры по снижению риска в короткие сроки (требуются средние затраты)
Существенный	Требуется принять ряд срочных мер по снижению риска (требуются значительные затраты)
Недопустимый	Требуется разработка комплекса мер по снижению риска (требуются огромные затраты)

ра может привести к обрушению несущих конструкций или перекрытий, что, в свою очередь, приведет к гибели людей. Вероятность такого события можно рассматривать как «Средняя», а последствия — «Критические». В данном случае принятие мер по увеличению расстояний между соседними транспортными средствами (увеличение площади мест парковки с ЭЗС), а также повышение пределов огнестойкости конструкций, ограждающих зону парковки электромобиля (дополнительная обработка огнезащитным составом или покрытие огнезащитой облицовкой), позволят снизить вероятность до уровня «Низкая», а последствия пожара до уровня «Незначительные».

Аналогичным образом можно рассмотреть различные сценарии, учитывающие особенности здания (жилое, нежилое, отдельная парковка или встроенная и т.д.). Далее оценить вероятность развития пожара и его последствий и выбрать ряд мер по снижению опасности для людей, имущества и самого здания с учетом особенностей процесса развития пожара в электромобиле и способов его тушения.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Харламенков А.С. Пожарная безопасность парковочных мест электромобилей // Пожаровзрывобезопасность/ Fire and Explosion Safety. 2023. Т. 32. № 6. С. 79–82. DOI: 10.22227/0869-7493.2023.32.06.79-82
2. T0194 — Covered car parks — fire safety guidance for electric vehicles. Interim guidance to support parking and/or charging of electric vehicles and the installation of electric vehicle chargepoints in covered car parks // Office for Zero Emission Vehicles (OZEV). Ove Arup & Partners Limited. 2023.
3. Cluzel D., Sarrat P. Methode ERIC. Evaluation du Risque Incendie par le Calcul // Proc. CIB Symposium on Systems Approach to Fire Safety in Buildings. 1979. Vol. I. Pp. II/37–II/58.
4. Sun P., Niu H., Bisschop R., Huang X. A review of battery fires in electric vehicles // Fire Technology. 2020. Vol. 56. Issue 4. Pp. 1361–1410. DOI: 10.1007/s10694-019-00944-3
5. Cui Y., Liu J., Cong B. et al. Characterization and assessment of fire evolution process of electric vehicles placed in parallel // Process Safety and Environmental Protection. 2022. Vol. 166. Pp. 524–534. DOI: 10.1016/j.psep.2022.08.055

Материал поступил в редакцию 20.01.2024

Received January 20, 2024

Информация об авторе

ХАРЛАМЕНКОВ Александр Сергеевич, заместитель начальника кафедры специальной электротехники, автоматизированных систем и связи, Академия Государственной противопожарной службы Министерства Российской Федерации по делам гражданской обороны, чрезвычайным ситуациям и ликвидации последствий стихийных бедствий, Россия, 129366, г. Москва, ул. Бориса Галушкина, 4; РИНЦ ID: 763967; e-mail: h_a_s@live.ru

Information about the author

Aleksandr S. KHARLAMENKOV, Deputy Head of Department of Special Electrical Engineering, Automation Systems and Communication, the State Fire Academy of the Ministry of Russian Federation for Civil Defense, Emergencies and Elimination on Consequences of Natural Disasters, Borisa Galushkina St., 4, Moscow, 129366, Russian Federation; ID RISC: 763967; e-mail: h_a_s@live.ru

ПРАВИЛА ДЛЯ АВТОРОВ!

Направляемые в журнал «ПОЖАРОВЗРЫВБЕЗОПАСНОСТЬ/FIRE AND EXPLOSION SAFETY» статьи должны содержать результаты научных исследований и испытаний, описания новых технических устройств и программно-информационных продуктов; обзоры, комментарии к нормативно-техническим документам, справочные материалы и т.п. Авторы должны указать, к какому типу относится их статья:

- научно-теоретическая;
- научно-эмпирическая;
- аналитическая (обзорная);
- дискуссионная;
- рекламная.

Не допускается направлять в редакцию работы, которые были опубликованы и/или приняты к печати в других изданиях.

Редакция просит авторов при подготовке рукописи руководствоваться изложенными ниже правилами.

1. Статья и сопутствующие ей материалы должны быть направлены через электронную редакцию по адресу info@fire-smi.ru.

Статья должна быть ясно и лаконично изложена и подписана всеми авторами (скан страницы с подписями). Основной текст статьи должен содержать в себе четкие, логически взаимосвязанные разделы. Все разделы должны начинаться приведенными ниже заголовками, выделенными полужирным начертанием. Для научной статьи традиционными являются следующие разделы:

- введение;
- материалы и методы (методология) — для научно-эмпирической статьи;
- теоретические основы (теория и расчеты) — для научно-теоретической статьи;
- результаты и их обсуждение;
- заключение (выводы).

Редакция допускает и иную структуру, обусловленную спецификой конкретной статьи (аналитической (обзорной), дискуссионной, рекламной) при условии четкого выделения разделов:

- введение;
- основная (аналитическая) часть;
- заключение (выводы).

Подробную информацию о содержании каждого из обозначенных выше разделов см. на сайте издательства www.fire-smi.ru.

Материал статьи должен излагаться в следующем порядке.

2.1. Номер УДК (универсальная десятичная классификация).

2.2. Заглавие статьи (на русском и английском языках). Заглавия научных статей должны быть точными и лаконичными и в то же время достаточно информативными; в них можно использовать только общепринятые сокращения. В переводе заглавий статей на английский язык недопустима транслитерация с русского языка, кроме непереводаемых названий собственных имен, приборов и других объектов, имеющих собственные названия, а также непереводаемый сленг, известный только русскоговорящим специалистам. Это касается также аннотаций, авторских резюме и ключевых слов.

2.3. Информация об авторах.

2.3.1. Имена, отчества и фамилии всех авторов. Они должны приводиться полностью на русском языке и в транслитерации в соответствии с системой, которая в настоящее время является наиболее распространенной (<http://fotosav.ru/services/transliteration.aspx>).

Авторами являются лица, принимавшие участие во всей работе или в ее главных разделах. Лица, участвовавшие в работе частично, указываются в сносках.

2.3.2. Ученые степени, звания, должность, место работы всех авторов с полным юридическим адресом (на русском и английском языках). Здесь необходимо указать: полное официальное название организации, страну, индекс, город, название улицы, номер дома,

а также контактные телефоны и электронные адреса всех авторов; дать информацию о контактном лице. Обращаем Ваше внимание, что при переводе необходимо указывать официально принятое название организации на английском языке. Все почтовые сведения (кроме наименования улицы, которое должно быть в транслитерированном виде) должны быть также переведены на английский язык, в том числе название города и страны.

Пример: *Institute for Problem in Mechanics, Russian Academy of Sciences (Vernadskogo Avenue, 101, Moscow, 119526, Russian Federation).*

2.3.3. ORCID, Researcher ID, Scopus Author ID.

2.4. Расширенное резюме на русском и английском языках. Необходимо иметь в виду, что авторское резюме на английском языке в русскоязычном издании является для иностранных ученых и специалистов основным и, как правило, единственным источником информации о содержании статьи и об изложенных в ней результатах исследований. Поэтому авторское резюме должно быть:

- информативным (не содержать общих слов);
- содержательным (должно отражать существенные результаты работы; не должно включать материал, который отсутствует в основной части публикации);
- структурированным (т.е. следовать логике описания результатов в публикации);
- грамотным (написанным качественным английским языком, без использования программ автоматизированного перевода);
- объемом не менее 200–250 слов.

Структура резюме должна повторять структуру статьи и включать четко обозначенные подразделы Введение (Introduction), Цели и задачи (Aims and Purposes), Методы (Methods), Результаты (Results), Обсуждение (Discussion), Заключение (выводы) (Conclusions).

Результаты работы следует описывать предельно точно и информативно. При этом должны приводиться основные теоретические и экспериментальные результаты, фактические данные, установленные взаимосвязи и закономерности.

Выводы могут сопровождаться рекомендациями, оценками, предложениями, гипотезами, описанными в работе.

Текст должен быть связным; излагаемые положения должны логично вытекать одно из другого.

Сокращения и условные обозначения, кроме общепотребительных, следует применять в исключительных случаях или давать их расшифровку и определение при первом упоминании в тексте резюме.

В авторское резюме не следует включать схемы, таблицы, иллюстрации, формулы, а также ссылки на публикации, приведенные в списке литературы к статье.

Для повышения эффективности при онлайн-поиске включите в текст аннотации ключевые слова и термины из основного текста и заглавия статьи.

2.5. Ключевые слова на русском и английском языках (не менее 5 слов или коротких словосочетаний). Они указываются через точку с запятой. Недопустимо в качестве ключевых слов использовать термины общего характера (например, проблема, решение и т.п.), не являющиеся специфической характеристикой публикации. Используемые в заголовке слова и термины не нужно повторять в качестве ключевых слов: ключевые слова должны дополнять информацию в заголовке. При переводе ключевых слов на английский язык избегайте по возможности употребления слов «and» (и), «of» (предлог, указывающий на принадлежность), артиклей «a», «the» и т.п.

2.6. Основной текст статьи должен быть набран через 1,5 интервала в формате Word. Формулы должны быть набраны в Microsoft Equation или MathType.

Цитируемый текст из других публикаций следует брать в кавычки. Таблицы, рисунки, методы, численные данные (за исключением общеизвестных величин), опубликованные ранее, должны сопровождаться ссылками.

Если представленные в статье исследования выполнены авторами при финансовой поддержке Российского фонда фундаментальных исследований, Российского научного фонда, Министерства образования и науки Российской Федерации и т.п., то в конце статьи обязательно следует дать информацию об этом с указанием номера и названия гранта (научного проекта, госконтракта и т.д.).

Сокращения и условные обозначения физических величин в тексте статьи должны соответствовать действующим международным стандартам. Формулы и буквенные обозначения должны быть четкими и ясными. Все буквенные обозначения, входящие в формулы, должны быть расшифрованы с указанием единиц измерения. Размерность всех характеристик должна соответствовать системе СИ. Иллюстрации в электронной версии прилагаются отдельно. Фотографии должны быть сделаны с хорошего негатива контрастной печатью (файлы растровых изображений предоставляются с разрешением не менее 300 dpi, черно-белая штриховая графика — 600 dpi). Файлы векторной графики следует предоставлять в формате той программы, в которой они созданы, либо печатать PDF-файл из этой программы. Все иллюстрации должны иметь сквозную нумерацию. Чертежи и карты в качестве иллюстраций неприемлемы. Ссылки на все рисунки в тексте обязательны.

Таблицы должны быть составлены лаконично и содержать только необходимые сведения; однотипные таблицы следует строить одинаково. Цифровые данные необходимо округлять в соответствии с точностью эксперимента. Сведения в таблицах и на рисунках не должны повторяться. Ссылки на все таблицы в тексте обязательны.

В журнале предусматривается двуязычное представление табличного и графического материала, поэтому необходимо прислать перевод на английский язык:

- для таблицы: ее названия, шапки, боковика, текста во всех строках, сноска и примечаний;
- для рисунка: подписочной подписи и всех текстовых надписей на самом рисунке;
- для схемы: подписи к ней и всего содержания самой схемы.

2.7. Пристайные списки литературы на русском языке и языке оригинала (если книга переводная).

Список литературы должен включать библиографические сведения обо всех публикациях, упоминаемых в статье, и не должен содержать указаний на работы, на которые в тексте нет ссылок. Литература должна быть оформлена в виде общего списка в порядке упоминания. В тексте ссылка на литературу отмечается порядковой цифрой в квадратных скобках, например [1]. Библиографические данные приводятся по титульному листу издания. Порядок изложения элементов библиографического описания определяется требованиями ГОСТ 7.1-2003 и ГОСТ Р 7.0.5-2008.

В описании источников необходимо указывать всех авторов.

Наряду с этим для научных статей список литературы должен отвечать следующим требованиям.

Список литературы должен содержать не менее 20 источников (в это число не входят нормативные документы, патенты, ссылки на сайты компаний и т.п.). При этом количество ссылок на статьи из иностранных научных журналов и другие иностранные источники должно быть не менее 40 % от общего количества ссылок. Не более половины от оставшихся 60 % должны составлять статьи из русскоязычных научных журналов, остальное — другие первоисточники на русском языке.

Не менее половины источников должно быть включено в один из ведущих индексов цитирования: Российский индекс научного цитирования eLibrary, Web of Science, Scopus, Chemical Abstracts, MathSciNet, Springer и др. В случае присвоения публикациям цифрового идентификатора объекта (DOI) его необходимо указать, что позволит однозначно идентифицировать объект в базах данных.

Состав источников должен быть актуальным и содержать не менее половины современных (не старше 10 лет) статей из научных журналов или других публикаций.

В списке литературы должно быть не более 30 % источников, автором либо соавтором которых является автор статьи.

Следует обратить внимание на публикации диссертаций (особенно докторских), защищенных в последние годы по ближайшей научной специальности или группе специальностей. Для поиска рекомендуется использовать ресурс <http://www.dissercat.com>.

Не следует включать в список литературы ГОСТы; ссылки на них должны быть даны непосредственно по тексту статьи.

Убедитесь, что указанная в списке литературы информация (Ф.И.О. автора, название книги или журнала, год издания, том, номер и количество (интервал) страниц) верна.

Неопубликованные результаты, проекты документов, личные сообщения и т.п. не следует указывать в списке литературы, но они могут быть упомянуты в тексте.

2.8. References (пристайные списки литературы на английском языке). Представление в References только транслитерированного (без перевода) описания недопустимо. Обращаем Ваше внимание, что перевод названия статей следует давать так, как он проходил при их публикации, а перевод названий журналов должен быть официально принятым. Произвольное сокращение названий источников цитирования приведет к невозможности идентифицировать ссылку в электронных базах данных.

При составлении References необходимо следовать схеме:

- ИОФ авторов (транслитерация; для ее написания используйте сайт <http://fotosav.ru/services/transliteration.aspx>, обязательно включив в настройках справа вверху флажок «Американская (для визы США)»; если автор цитируемой статьи имеет свой вариант транслитерации своей фамилии, следует использовать этот вариант);
- заглавие на английском языке — для статьи, транслитерация и перевод названия — для книги;
- название источника (журнала, сборника статей, материалов конференции и т.п.) в транслитерации и на английском языке (курсивом, через косую черту);
- выходные данные;
- указание на язык изложения материала в скобках (например, (in Russian)).

Например: D.N. Sokolov, L.P. Vogman, V.A. Zuykov. Microbiological spontaneous ignition. *Pozharnaya bezopasnost / Fire Safety*, 2012, no. 1, pp. 35-48 (in Russian) (Другие примеры см. www.fire-smi.ru).

3. Статьи, присланные не в полном объеме, на рассмотрение не принимаются.

4. В случае получения замечаний в ходе внутреннего рецензирования статьи авторы должны предоставить доработанный вариант текста в срок не более одного месяца с обязательным выделением цветом внесенных изменений, а также отдельно подготовить конкретные ответы-комментарии на все вопросы и замечания рецензента.

Несвоевременный, а также неадекватный ответ на замечания рецензентов и научных редакторов приводит к задержке публикации до исправления указанных недостатков. При игнорировании замечаний рецензентов и научных редакторов рукопись снимается с дальнейшего рассмотрения.

5. Непринятые к публикации статьи автору не возвращаются. Просьба редакции о переработке материала не означает, что он принят к печати. Предпечатная подготовка статей оплачивается за счет средств подписчиков и третьих лиц, заинтересованных в публикации.

Редакция оставляет за собой право считать, что авторы, представившие рукопись для публикации в журнале «Пожаровзрывобезопасность/Fire and Explosion Safety», согласны с условиями публикации или отклонения рукописи, а также с правилами ее оформления!

Николай Николаевич БРУШЛИНСКИЙ

28.10.1934 – 02.02.2024



С прискорбием сообщаем, что 2 февраля 2024 г. на 90-м году жизни скончался полковник внутренней службы, д-р техн. наук, профессор, академик РАЕН, математик, выдающийся специалист в области математического моделирования сложных систем и прикладной статистики **Николай Николаевич БРУШЛИНСКИЙ**.

Николай Николаевич родился 28 октября 1934 г. в Москве в семье математиков.

После окончания в 1952 г. школы — бывшей алферовской гимназии — поступил в МГУ им. М.В. Ломоносова на механико-математический факультет. В университете занимался у известных ученых-академиков — математиков Павла Александрова, Льва Понтрягина, Сергея Соболева, механика Леонида Седова.

С 1958 г. после окончания университета начал преподавать математику в Военно-политической академии им. Ленина. В 1960 г. молодой ученый Николай Брушлинский пришел работать на факультет инженеров противопожарной техники и безопасности при Московской Высшей школе МВД СССР.

В Академии противопожарной службы Николай Николаевич работал в разных должностях: от преподавателя, старшего преподавателя, доцента кафедры высшей математики (1960–1974 гг.) до начальника НИЦ управления безопасностью сложных систем (с 2003 г.).

Николай Николаевич Брушлинский — основатель научного направления: системный анализ и моделирование экстренных и аварийно-спасательных служб (ЭАСС) городов в целях повышения эффективности их деятельности. В рамках этого направления им создана международная научная школа, подготовлены свыше 45 кандидатов и 10 докторов наук для России, Латвии, Болгарии, Венгрии, Вьетнама, Германии, Кубы, Польши, Чехии и других стран.

Николай Николаевич разработал теорию организации, функционирования и управления ЭАСС городов. На ее основе установлены первые научно-обоснованные нормативы по организации противопожарных служб в городах, вошедшие в нормативные документы, действующие до сих пор в России и странах СНГ. Для реализации теории на практике создал (вместе с учениками) специальные компьютерные технологии «КОСМАС» и «СТРЕС», имеющие международные премии и дипломы и работающие во многих городах мира. Для информационного обеспечения всех этих исследований ввел пожарную статистику, ежегодные отчеты о состоянии которой идут в 40–45 стран мира и ООН (на трех языках). В этих целях в 1995 г. Николай Николаевич основал Центр пожарной статистики при Международном техническом комитете по предупреждению и тушению пожаров (КТИФ), которым руководил все эти годы.

Н.Н. Брушлинский заложил основы теории пожарных рисков, способствующей улучшению формирующейся в мире теории рисков и безопасности.

Николай Николаевич опубликовал более 350 научных работ (монографий, книг, учебников, учебных пособий, статей), 70 из которых — за рубежом (Австралия, Великобритания, Германия, США, Югославия и др.).

В 1999 г. награжден орденом Дружбы. В 2002 г. ему присвоено звание «Заслуженный деятель науки РФ».

Мы гордимся, что Н.Н. Брушлинский долгие годы был членом Редакционной коллегии нашего журнала «Пожаровзрывобезопасность». Он часто выступал в качестве строгого, но справедливого рецензента, публиковал также и результаты своих научных работ и своих учеников.

Редакция журнала понесла невосполнимую утрату и с глубоким прискорбием прощается с Николаем Николаевичем Брушлинским, талантливым ученым и организатором, добрым, трудолюбивым и отзывчивым человеком. Память о нем навсегда сохранится в наших сердцах, сердцах его коллег, друзей и учеников.