

4-2025

**FIRE SAFETY** ПОЖАРОВЗРЫВО-

# БЕЗОПАСНОСТЬ



НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКИЙ ЖУРНАЛ

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

КОМПЛЕКСНАЯ БЕЗОПАСНОСТЬ

пожарная • промышленная • производственная • экологическая



СТАТИСТИЧЕСКИЕ ДАННЫЕ  
ПО ЧАСТОТАМ ВОЗНИКНОВЕНИЯ  
ПОЖАРОВ НА РАЗЛИЧНЫХ  
ПРОИЗВОДСТВЕННЫХ  
И СКЛАДСКИХ ОБЪЕКТАХ В РФ

## 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 **Табеева А.Р.**  
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 28.08.2025.

Выход в свет 29.08.2025.

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, Ньютаунбри, 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)

**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, Университи-Парк, Пенсильвания, США)

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

## СОДЕРЖАНИЕ

## CONTENTS

### БЕЗОПАСНОСТЬ ВЕЩЕСТВ И МАТЕРИАЛОВ

### SAFETY OF SUBSTANCES AND MATERIALS

В.З. ВУ, Х.Б. НГУЕН, Р.И. НИГМЕТЗЯНОВ  
Исследование влияния ультразвука на синтез  
нанотрубок TiO<sub>2</sub> гидротермальным методом

5

V.Z. VU, H.B. NGUYEN, R.I. NIGMETZANOV  
Investigation of the influence of ultrasound on the synthesis  
of TiO<sub>2</sub> nanotubes by the hydrothermal method

Е.Ю. ПОЛИЩУК, Е.Ю. КРУГЛОВ, В.А. КУДРЯШОВ,  
В.С. ШОЯ, М.В. ГРАВИТ, И.Л. КОТЛЯРСКАЯ  
Проблемы обеспечения воспроизводимости измерений  
в системе стандартов пожарной безопасности:  
Метод II ГОСТ 30244

14

E.Yu. POLISHCHUK, E.Yu. KRUGLOV, V.A. KUDRYASHOV,  
V.S. SHOYA, M.V. GRAVIT, I.L. KOTLYARSKAYA  
Problems of ensuring reproducibility of measurements  
in the system of fire safety standards:  
Method II GOST 30244

### БЕЗОПАСНОСТЬ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ И ОБОРУДОВАНИЯ

### SAFETY OF TECHNOLOGICAL PROCESSES AND EQUIPMENT

А.М. КОЩЕЕВА, К.В. ШЕЛАМОВ, А.В. ПОНИЗОВ  
Оценка пожаровзрывобезопасного применения  
анионообменной смолы АВ-17-8 в нитратной форме  
в сорбционной колонне

32

A.M. KOSCHEEVA, K.V. SHELAMOV, A.V. PONIZOV  
Assessment of fire and explosion safe use  
of the anion exchange resin AV-17-8 in nitrate form  
in a sorption column

### СТАТИСТИКА И СИСТЕМНЫЙ АНАЛИЗ

### STATISTICS AND SYSTEM ANALYSIS

А.Н. ПОЛЕТАЕВ, В.С. ГОНЧАРЕНКО,  
Ю.Ю. ЖУРАВЛЕВ, Е.С. КИРИК, М.Ю. НЕСТЕРОВ  
Статистические данные по частотам возникновения  
пожаров на различных производственных  
и складских объектах в РФ

42

A.N. POLETAEV, V.S. GONCHARENKO,  
Yu.Yu. ZHURAVLEV, E.S. KIRIK, M.Yu. NESTEROV  
Fire frequency statistics for various  
production and warehouse facilities  
in the Russian Federation

### БЕЗОПАСНОСТЬ ЗДАНИЙ, СООРУЖЕНИЙ, ОБЪЕКТОВ

### SAFETY OF BUILDINGS, STRUCTURES, OBJECTS

Е.В. ГОЛОВИНА, А.В. КАЛАЧ, В.А. СКОРОБОГАТОВ  
Исследование огнезащитных свойств интумесцентных  
материалов, применяемых на промышленных объектах  
Арктического региона при ускоренном старении

62

E.V. GOLOVINA, A.V. KALACH, V. A. SKOROBOGATOV  
Investigation of the flame retardant properties of intumescent  
materials used at industrial facilities in the Arctic region  
with accelerated aging

С.В. ПУЗАЧ, Н.И. КОНСТАНТИНОВА,  
Р.Г. АКПЕРОВ, А.О. ОВЧИННИКОВ  
Оценка пожарной опасности гостиниц с учетом параметров  
терморазложения мягких элементов мебели

73

S.V. PUZACH, N.I. KONSTANTINOVA,  
R.G. AKPEROV, A.O. OVCHINNIKOV  
Assessing hotel fire hazards with regard for parameters  
of thermal decomposition of upholstered furniture elements

### ВОПРОС – ОТВЕТ

### QUESTION – ANSWER

А.С. ХАРЛАМЕНКОВ  
Анализ токсичных выбросов и опасных факторов пожара  
при тепловом разгоне литий-ионных батарей

83

A.S. KHARLAMENKOV  
Thermal runaway of lithium-ion batteries:  
analysis of toxic emissions and fire hazards

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.



Проблемы обеспечения воспроизводимости измерений в системе стандартов пожарной безопасности: Метод II ГОСТ 30244

Стр. 14



Стр. 42

Статистические данные по частотам возникновения пожаров на различных производственных и складских объектах в РФ



Исследование огнезащитных свойств интумесцентных материалов, применяемых на промышленных объектах Арктического региона при ускоренном старении

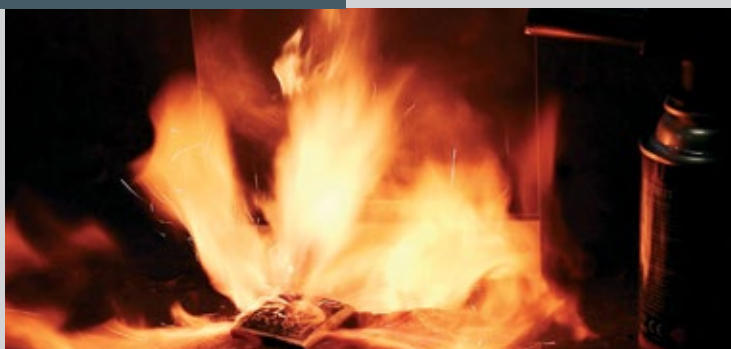
Стр. 62



Стр. 73

Оценка пожарной опасности гостиниц с учетом параметров терморазложения мягких элементов мебели

Стр. 83



Анализ токсичных выбросов и опасных факторов пожара при тепловом разгоне литий-ионных батарей

No. **4** VOL. **34**  
**2025**

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 **Tabekova A.R.**

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](mailto: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 28.08.2025.

Date of publication 29.08.2025.

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)

**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)

## Исследование влияния ультразвука на синтез нанотрубок $\text{TiO}_2$ гидротермальным методом

Ван Зунг Ву, Хю Бач Нгуен, Равиль Исламович Нигметзянов ✉

Московский автомобильно-дорожный государственный технический университет (МАДИ), г. Москва, Россия

### АННОТАЦИЯ

**Введение.** В данном исследовании нанотрубки  $\text{TiO}_2$  были синтезированы гидротермальным методом с предварительной ультразвуковой обработкой в течение двух часов для оценки роли ультразвука в формировании наноструктур. Гидротермальный процесс проводился в течение 4, 6, 8 и 10 ч для выявления изменения морфологии и кристаллических фаз.

**Цель и задачи.** Целью данного исследования была оптимизация ультразвуково-гидротермального метода синтеза нанотрубок  $\text{TiO}_2$  путем сокращения времени реакции без ухудшения морфологических и структурных характеристик.

**Материалы и методы.** Синтезированные образцы были изучены с использованием сканирующей электронной микроскопии (СЭМ) для анализа морфологии и размеров, а также с помощью рамановской спектроскопии, инфракрасной спектроскопии с преобразованием Фурье (Фурье-ИК) и рентгеноструктурного анализа (РСА) для определения фазового состава и кристаллической структуры.

**Результаты и обсуждение.** Использование ультразвуковой предварительной обработки показало, что полученные нанотрубки имели длину от 808 до 1226 нм и диаметр от 172 до 242 нм. Была зафиксирована последовательная фазовая трансформация: начальная фаза  $\text{H}_2\text{Ti}_3\text{O}_7$  переходила в промежуточные титанатные фазы ( $\text{H}_2\text{Ti}_3\text{O}_7$  и  $\text{H}_2\text{Ti}_6\text{O}_{13}$ ), а затем при увеличении времени реакции происходило образование рутила. Фаза анатаза присутствовала лишь в следовых количествах.

**Выводы.** Настоящее исследование подчеркивает положительное влияние ультразвуковой предварительной обработки на формирование структуры нанотрубок  $\text{TiO}_2$  и представляет собой научную основу для оптимизации параметров процесса при получении наноструктурированных материалов на основе  $\text{TiO}_2$ .

**Ключевые слова:** ультразвуковая обработка; гидротермальный синтез; структура нанотрубок  $\text{TiO}_2$

**Для цитирования:** Ван Зунг Ву, Хю Бач Нгуен, Нигметзянов Р.И. Исследование влияния ультразвука на синтез нанотрубок  $\text{TiO}_2$  гидротермальным методом // Пожаровзрывобезопасность/Fire and Explosion Safety. 2025. Т. 34. № 4. С. 5–13. DOI: 10.22227/0869-7493.2025.34.04.5-13

✉ Нигметзянов Равиль Исламович, e-mail: lefmo@yandex.ru

## Investigation of the influence of ultrasound on the synthesis of $\text{TiO}_2$ nanotubes by the hydrothermal method

Van Zung Vu, Huy Bach Nguyen, Ravil I. Nigmatzyanov ✉

Moscow Automobile and Road Construction State Technical University (MADI), Moscow, Russian Federation

### ABSTRACT

**Introduction.** In this study, the synthesis of  $\text{TiO}_2$  nanotubes was carried out via the hydrothermal method, following two hours of ultrasonic pretreatment to evaluate the role of ultrasound in nanostructure formation. The hydrothermal process was conducted for 4, 6, 8, and 10 hours to investigate changes in morphology and crystalline phases.

**Research aims and objectives.** This study aimed to optimize the ultrasonic-hydrothermal method for synthesizing  $\text{TiO}_2$  nanotubes by reducing the reaction time without compromising the morphological and structural characteristics.

**Materials and methods.** The synthesized specimens underwent characterization by scanning electron microscopy (SEM) for morphological and dimensional analysis, while Raman spectroscopy, Fourier-transform infrared spectroscopy (FTIR), and X-ray diffraction (XRD) served to identify phase composition and crystal structure.

**Results and discussion.** The results indicated that the obtained nanotubes exhibited lengths ranging from approximately 808 to 1,226 nm and diameters from 172 to 242 nm. A sequential phase transformation occurred, beginning with the initial  $\text{H}_2\text{Ti}_3\text{O}_7$  phase, progressing through intermediate titanate phases ( $\text{H}_2\text{Ti}_3\text{O}_7$  and  $\text{H}_2\text{Ti}_6\text{O}_{13}$ ),

and culminating in rutile crystallization at extended reaction times. The anatase phase appeared only in trace amounts throughout the process.

**Conclusions.** This study highlights the positive impact of ultrasonic pretreatment on the development of TiO<sub>2</sub> nanotube structures and provides a scientific basis for optimizing process parameters in the fabrication of nanostructured TiO<sub>2</sub> materials.

**Keywords:** ultrasonic treatment; hydrothermal synthesis; TiO<sub>2</sub> nanotube structure

**For citation:** Van Zung Vu, Huy Bach Nguyen, Nigmatzyanov R.I. Investigation of the influence of ultrasound on the synthesis of TiO<sub>2</sub> nanotubes by the hydrothermal method. *Pozharovzryvobezopasnost/Fire and Explosion Safety*. 2025; 34(4):5-13. DOI: 10.22227/0869-7493.2025.34.04.5-13 (rus).

✉ Ravil Islamovich Nigmatzyanov, e-mail: lefmo@yandex.ru

## Введение

Нанотрубки TiO<sub>2</sub>, характеризующиеся своей одномерной структурой, обладают высокой удельной поверхностью, а также превосходной электронной и ионной проводимостью, что расширяет спектр их потенциальных применений в области экологии, энергетики, электроники и биомедицины [1]. Одной из ключевых областей применения является антикоррозионное покрытие и хранение ингибиторов коррозии, где способность образовывать стабильный оксидный слой способствует лучшей защите металлических поверхностей за счет минимизации воздействия кислорода и агрессивных сред [2]. В энергетике нанотрубки TiO<sub>2</sub> играют важную роль в красочно-сенсibilizированных красителях солнечных элементах (DSSC) [3], в фотокаталитическом расщеплении воды для получения водорода, а также в качестве электродов в литий-ионных аккумуляторах [4]. В биомедицинской области они применяются как антибактериальные агенты, в составе перевязочных материалов и в системах контролируемого высвобождения лекарственных веществ [5]. Кроме того, благодаря высокой ионной проводимости они представляют собой перспективные материалы для применения в суперконденсаторах для накопления энергии [6].

Гидротермальный метод синтеза рассматривается как перспективный подход для получения нанотрубок TiO<sub>2</sub> благодаря его масштабируемости, относительной простоте процедуры и высокому выходу искомого продукта [7, 8]. Однако данный метод имеет ряд существенных недостатков, таких как продолжительное время синтеза (от 24 до 72 ч), что замедляет как научные исследования, так и практическое применение. Кроме того, высокая энергоёмкость отрицательно влияет на эффективность применения процесса и увеличивает эксплуатационные затраты [9–11]. В связи с этим изучение и разработка альтернативных или комбинированных методов, таких как ультразвуковой гидротермальный синтез, рассматриваемый в настоящем исследовании, представляют значительный интерес. Этот подход позволяет сократить время синтеза, снизить энергопотребление и при этом сохранить ключевые

свойства нанотрубок TiO<sub>2</sub>, что делает его перспективным и актуальным направлением. Ускорение синтеза будет способствовать повышению эффективности производственных процессов и расширению практического применения в различных областях технологий и материаловедения.

## Материалы и методы

*Материалы:* диоксид титана «Degussa P25», гидроксид натрия, соляная кислота, деионизированная вода.

*Методы:* 1,5 г диоксида титана Degussa P25 добавляли к 50 мл 10М раствора NaOH и перемешивали в течение 15 мин с помощью магнитной мешалки. Затем полученную суспензию подвергали ультразвуковой обработке в течение 2 ч при частоте 22 кГц с использованием ультразвукового диспергатора УЗГ13-0.1/22.

После ультразвуковой обработки суспензию помещали в автоклав для проведения гидротермального синтеза при температуре 200 °С в течение 4, 6, 8 и 10 ч.

По завершении гидротермального процесса суспензию переливали в химический стакан объемом 1000 мл, содержащий 400 мл разбавленного раствора соляной кислоты (0,2М), и перемешивали в течение 30 мин. Полученную смесь фильтровали и промывали несколько раз деионизированной водой для достижения нейтрального pH. В завершение суспензию фильтровали через лабораторную воронку Schott POR 16 и подвергали естественной сушке до получения конечного продукта.

## Методы анализа

Оценку синтезированного материала на основе нанотрубок TiO<sub>2</sub> проводили аналитическими методами морфологического и структурного анализа. Морфология материала исследовалась с использованием сканирующей электронной микроскопии (СЭМ) на установке «JEOL-4000 EX High-Resolution Electron Microscopy». Кристаллическая структура определялась методом рентгеновской дифракции (РСА) с применением дифрактометра «Siemens D-500 X-ray Diffraction System». Рамановская спек-

троскопия проводилась на спектрометре «HRS-500» с детектором «Pylop 100BR». Также была выполнена инфракрасная спектроскопия с преобразованием Фурье (ИК-Фурье) на спектрометре «Vertex 80v» в диапазоне  $400\text{--}4000\text{ см}^{-1}$  с разрешением  $4\text{ см}^{-1}$ .

### Результаты и обсуждение

Морфологический анализ с использованием СЭМ четырех образцов нанотрубок  $\text{TiO}_2$ , синтезированных посредством двухчасовой ультразвуковой предварительной обработки с последующей гидротермальной обработкой в щелочной среде  $\text{NaOH}$  при различной продолжительности (4, 6, 8 и 10 ч), выявил четкие структурные преобразования в зависимости от времени реакции (рис. 1).

Среди исследованных образцов хорошие морфологические характеристики были зафиксированы у образцов, обработанных в течение 4 и 10 ч. В образце, обработанном в течение 4 ч, образовались нанотрубки с равномерными размерами (средняя длина 1100 нм, средний диаметр 200 нм), гладкой поверхностью, низкой степенью агрегации и хорошей диспергируемостью, что свидетельствует об эффективном начальном этапе формирования нанотрубок.

В то же время образец после 10-часовой обработки продемонстрировал полностью реорганизованную трубчатую структуру с меньшим диаметром ( $\sim 170\text{ нм}$ ), высокой однородностью, гладкой поверхностью и минимальной агрегацией, что указывает на высокую морфологическую стабильность. Несмотря на то что 10-часовой образец демонстрирует оптимальные морфологические параметры, его синтез требует более длительного времени по сравнению с 4-часовым образцом (табл.).

РСА-анализ (рис. 2) показывает выраженное фазовое преобразование материала в зависимости от времени гидротермальной обработки и предоставляет подробную информацию о характерных кристаллографических плоскостях сформированных фаз.

На графиках видно постепенное формирование титанатных структур по мере увеличения времени гидротермальной обработки. Уже после 4 ч обработки (рис. 2, *a*) наблюдался слабый дифракционный пик при  $2\theta \approx 9,7^\circ$ , соответствующий значению (200) фазы  $\text{H}_2\text{Ti}_3\text{O}_7$ , что свидетельствует о начале формирования слоистой титанатной структуры. Одновременное наличие пиков при  $2\theta \approx 24,4^\circ$  (значение (110) рутила  $\text{TiO}_2$ ) и  $2\theta \approx 28,6^\circ$  (значение (002) фазы  $\text{H}_2\text{Ti}_6\text{O}_{13}$ ) указывает на начальную ста-

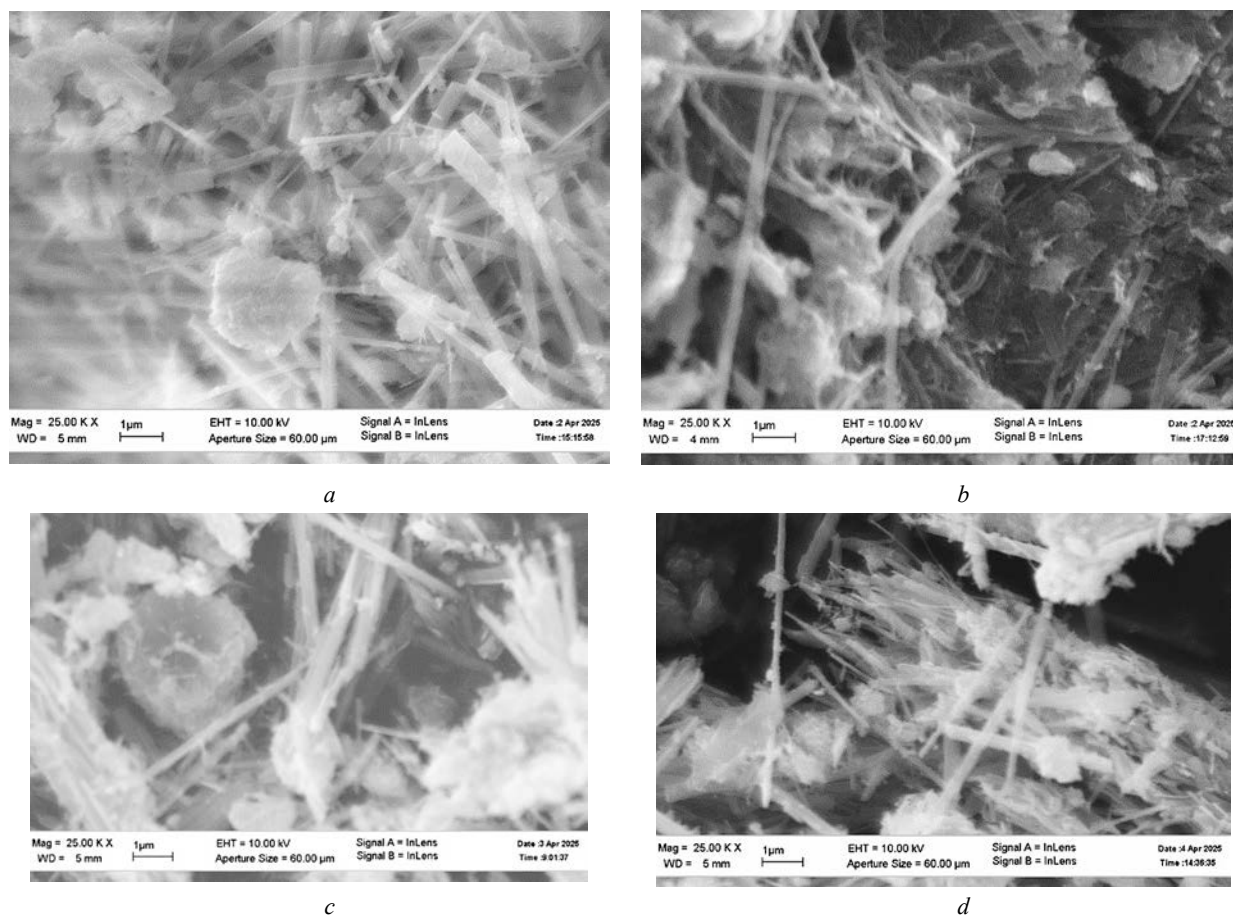


Рис. 1. СЭМ-анализ нанотрубок  $\text{TiO}_2$ : *a* — 4 ч; *b* — 6 ч; *c* — 8 ч; *d* — 10 ч

Fig. 1. SEM analysis of  $\text{TiO}_2$  nanotubes: *a* — 4 hours; *b* — 6 hours; *c* — 8 hours; *d* — 10 hours

Морфологический анализ на основе СЭМ-изображений образцов нанотрубок  $\text{TiO}_2$ , синтезированных комбинированной ультразвуково-гидротермальной обработкой при различной продолжительности гидротермальной реакции  
Morphological analysis based on SEM images of  $\text{TiO}_2$  nanotube specimens synthesized by combined ultrasonic-hydrothermal treatment at different hydrothermal reaction durations

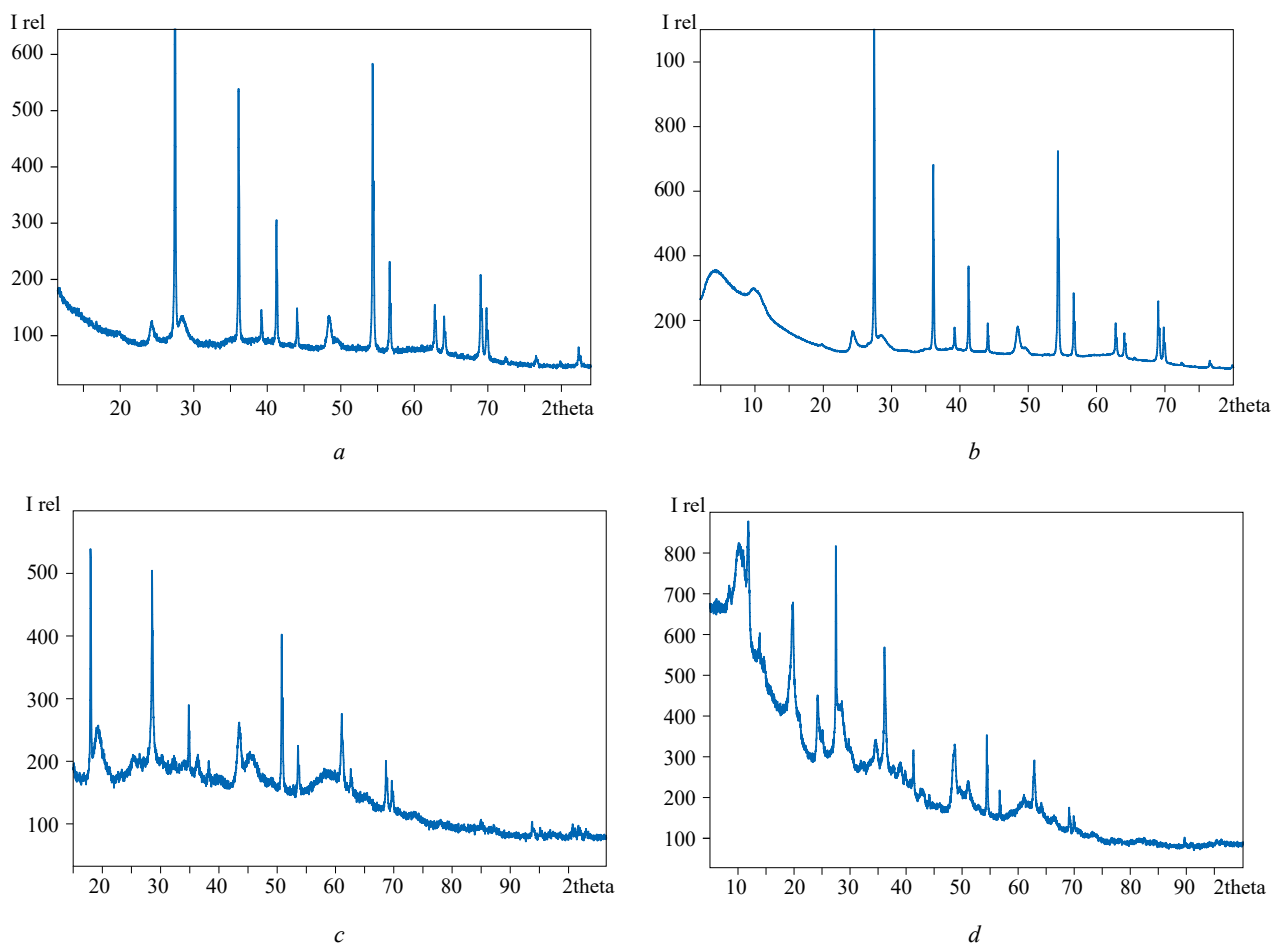
| Параметр<br>Parameter  | Время гидротермального синтеза<br>Hydrothermal synthesis time |  |  |  |
|--|---|--|--|--|
|  | 4 ч<br>4 hours  | 6 ч<br>6 hours   | 8 ч<br>8 hours   | 10 ч<br>10 hours   |
| Однородность нанотрубок<br>Homogeneity of nanotubes  | Хорошая<br>Good   | Неудовлетворительная<br>Poor                             | Удовлетворительная<br>Fair   | Хорошая<br>Good  |
| Степень агрегации<br>Degree of aggregation   | Умеренная<br>Moderate   | Очень высокая<br>Very high                               | Умеренная<br>Moderate  | Умеренная<br>Moderate  |
| Средняя длина, нм<br>Average length, nm  | 1118  | 808  | 1226   | 1179   |
| Среднеквадратичное отклонение длины $\sigma$ , нм<br>Root mean square deviation of length $\sigma$ , nm      | 153   | 106  | 173  | 314  |
| Поверхность трубок<br>Surface of the tubes   | Гладкая, небольшое количество частиц<br>Smooth, few particles | Неровная, неразборчивые структуры<br>Covered, indistinct | Гладкая, четко выраженные концы трубок<br>Smooth, well-defined tube ends | Гладкая, четко выраженные концы трубок<br>Smooth, well-defined tube ends |
| Диспергируемость<br>Dispersibility   | Хорошая<br>Good   | Неудовлетворительная<br>Poor                             | Хорошая<br>Good  | Хорошая<br>Good  |
| Средний диаметр, нм<br>Average diameter, nm  | 208   | 219  | 242  | 172  |
| Среднеквадратичное отклонение диаметра $\sigma$ , нм<br>Root mean square deviation of diameter $\sigma$ , nm | 24  | 36   | 31   | 22   |

дию трансформации  $\text{TiO}_2$  в титанатные фазы. При увеличении продолжительности обработки до 6 ч (рис. 2, *b*) характерные пики становятся более отчетливыми, особенно при  $2\theta \approx 9,7^\circ$  и  $24,3^\circ$ , которые соответствуют значениям (200) и (020) фазы  $\text{H}_2\text{Ti}_3\text{O}_7$  соответственно, что указывает на повышение степени кристалличности слоистой структуры. Одновременно наблюдаются пики при  $2\theta \approx 31,7^\circ$ ,  $48,6^\circ$  и  $50,1^\circ$ , соответствующие значениям (110), (020) и (202) фазы  $\text{H}_2\text{Ti}_6\text{O}_{13}$ , что подтверждает существование двух титанатных фаз — слоистой  $\text{H}_2\text{Ti}_3\text{O}_7$  и цепочечной  $\text{H}_2\text{Ti}_6\text{O}_{13}$ . После 8 ч обработки (рис. 2, *c*) фаза  $\text{H}_2\text{Ti}_6\text{O}_{13}$  становится доминирующей, о чем свидетельствуют интенсивные дифракционные пики при  $2\theta \approx 31,7$  и  $48,6^\circ$ , соответствующие значениям (110) и (400), тогда как пики анатаза и рутила практически исчезают, указывая на завершённую трансформацию  $\text{TiO}_2$  в цепочечную титанатную фазу, сопровождаемую выраженной предпочтительной кристаллографической ориентацией вдоль направления роста титанатной структуры. В образце, подвергнутом 10-часовой обработке (рис. 2, *d*), помимо характерных пиков  $\text{H}_2\text{Ti}_6\text{O}_{13}$ , появляется новый пик при  $2\theta \approx 11,3^\circ$ , соответствующий

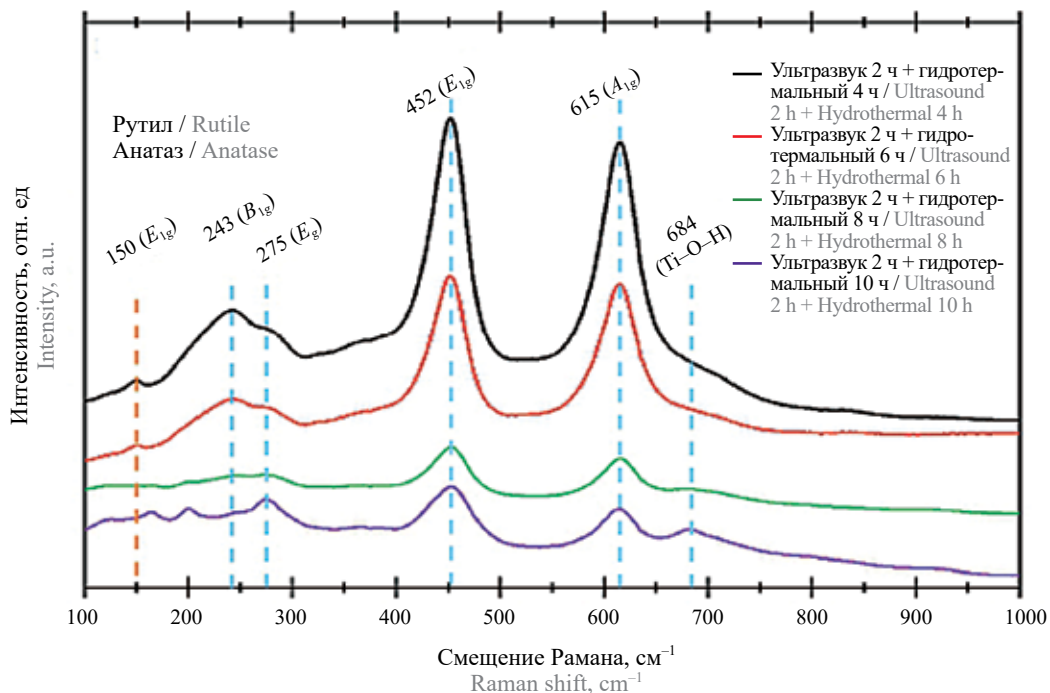
значению (001) гидратированной фазы  $\text{H}_2\text{Ti}_3\text{O}_7 \cdot \text{H}_2\text{O}$ , что указывает на внедрение молекул воды в слоистую структуру. Дополнительно наблюдается пик при  $2\theta \approx 27,5^\circ$ , связанный с плоскостью (111) фазы  $\text{Ti}_3\text{O}_5$ , что свидетельствует о возможной структурной перестройке или образовании вторичных фаз, обусловленных длительной гидротермальной обработкой [10–13].

Рамановские спектры образцов нанотрубок  $\text{TiO}_2$ , подвергнутых ультразвуковой и гидротермальной обработке, свидетельствуют о преимущественном формировании рутильной фазы (рис. 3), о чем говорят характерные пики при  $452 \text{ см}^{-1}$  ( $E_g$ ),  $615 \text{ см}^{-1}$  ( $A_{1g}$ ) и  $684 \text{ см}^{-1}$  (связанный с колебаниями Ti–O–H или модой  $A_{1g}$  рутила). Пик анатаза при  $150 \text{ см}^{-1}$  ( $E_g$ ) проявляется относительно слабо, что может указывать на низкое содержание анатаза или его преобразование в другие фазы. Постепенное снижение интенсивности рамановских пиков с увеличением продолжительности гидротермальной обработки отражает снижение степени кристалличности или изменения в кристаллической структуре  $\text{TiO}_2$  [14, 15].

Диаграмма фазового распределения в зависимости от времени гидротермальной обработки (рис. 4)



**Рис. 2.** Графики PCA анализа образцов нанотрубок  $\text{TiO}_2$ : *a* — 4 ч; *b* — 6 ч; *c* — 8 ч; *d* — 10 ч  
**Fig. 2.** XRD analysis graphs of  $\text{TiO}_2$  nanotube specimens: *a* — 4 hours; *b* — 6 hours; *c* — 8 hours; *d* — 10 hours



**Рис. 3.** Рамановские спектры образцов нанотрубок  $\text{TiO}_2$ , синтезированных комбинированной ультразвуково-гидротермальной обработкой  
**Fig. 3.** Raman spectra of  $\text{TiO}_2$  nanotube specimens synthesized by combined ultrasonic-hydrothermal treatment

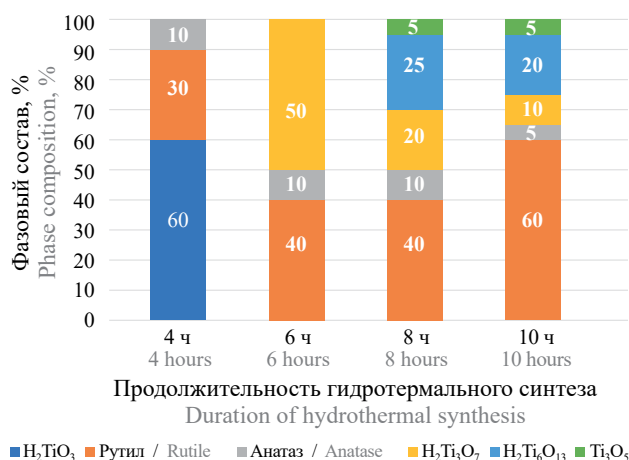


Рис. 4. Распределение кристаллических фаз в зависимости от времени гидротермальной обработки

Fig. 4. Distribution of crystalline phases as a function of hydrothermal treatment time

была построена на основе данных РСА и рамановской спектроскопии с целью прояснения процесса кристаллографической фазовой трансформации материала нанотрубок TiO<sub>2</sub>.

В процессе гидротермальной обработки распределение кристаллических фаз существенно изменялось в зависимости от времени реакции. На начальном этапе доминирующей фазой была H<sub>2</sub>TiO<sub>3</sub>, что отражает ее роль в качестве промежуточного продукта ранней стадии. По мере развития реакции основную фазу стала составлять H<sub>2</sub>Ti<sub>3</sub>O<sub>7</sub>, что свидетельствует

о продолжающейся фазовой трансформации, при этом начала появляться рутильная фаза, доля которой постепенно увеличивалась. В образцах, полученных на более поздних стадиях, система эволюционировала в многофазный материал с наличием H<sub>2</sub>Ti<sub>6</sub>O<sub>13</sub> и Ti<sub>3</sub>O<sub>5</sub>, что указывает на выраженный переходный этап. В конечном итоге рутил стал преобладающей фазой, а содержание промежуточных фаз снизилось, что свидетельствует о стабилизации кристаллизации при длительной гидротермальной обработке. Фаза анатаза сохранялась в незначительном количестве на протяжении всего процесса. Таким образом, гидротермальная реакция способствовала фазовой трансформации от слоистых титанатов к рутилу — наиболее термодинамически стабильной фазе [16].

Спектры ИК-Фурье (рис. 5) четырех образцов свидетельствуют о формировании титанатных структур в синтезированных нанотрубках TiO<sub>2</sub>, что подтверждается характерными полосами поглощения в районе 450 см<sup>-1</sup> (деформация Ti–O–Ti), 890 см<sup>-1</sup> (растяжение Ti–O) и выраженным пиком при 995 см<sup>-1</sup>, ассоциированным с образованием связей Ti–O–Na или Ti–O–H в щелочной среде. Дополнительные полосы в области около 1620 см<sup>-1</sup> и 3500 см<sup>-1</sup> соответствуют адсорбированной воде и поверхностным гидроксильным группам, отражая особенности химии поверхности и каталитических свойств материала [17–20].

Выраженные изменения в интенсивности и положении полос поглощения на ИК-Фурье спектрах отражают структурные преобразования поверхности

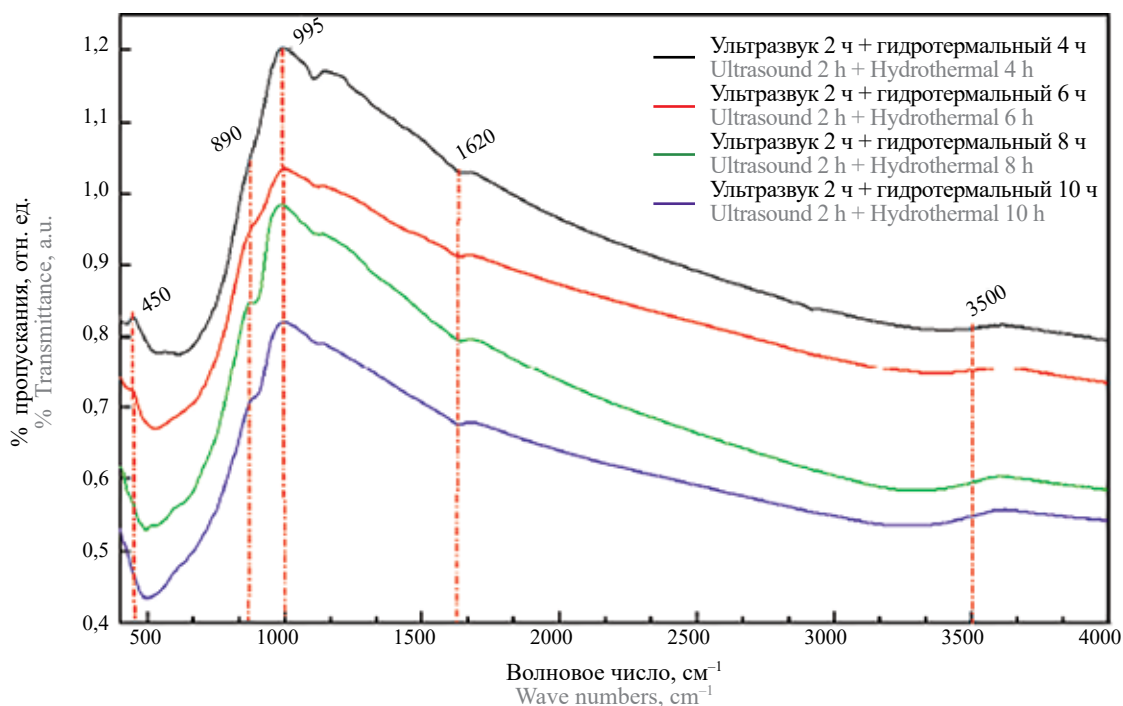


Рис. 5. ИК-Фурье спектры образцов нанотрубок, синтезированных методом комбинированной ультразвуково-гидротермальной обработки

Fig. 5. FTIR spectra of nanotube specimens synthesized by the combined ultrasonic-hydrothermal treatment method

нанотрубок, в первую очередь связанные с функциональными группами Ti–ОН и –ОН в ходе гидротермальной обработки. Постепенное снижение интенсивности сигналов, связанных с гидроксильными группами, указывает на поверхностную реорганизацию и постепенное удаление нестабильных гидроксильных фрагментов, сопровождающееся структурной перестройкой и повышением степени кристалличности материала. Полученные результаты согласуются с данными РСА, которые демонстрируют образование стабильных кристаллических фаз, таких как рутил и  $Ti_3O_5$ , после определенной продолжительности обработки, что свидетельствует о фазовом переходе от первоначально аморфной структуры к более упорядоченным кристаллическим формам. Эти наблюдения также подтверждаются результатами СЭМ-анализа. Одновременно рамановская спектроскопия демонстрирует появление и усиление характерных полос, что коррелирует с формированием кристаллических фаз, идентифицированных методом РСА.

### Выводы

В данном исследовании введение предварительной ультразвуковой обработки до стадии гидротер-

мального синтеза оказало решающее влияние на формирование физико-химических свойств системы  $TiO_2/NaOH$ . Ультразвуковые колебания создают интенсивные сдвиговые напряжения, которые эффективно разрушали агрегаты частиц  $TiO_2$ , способствуя их диспергированию и увеличению удельной реакционной поверхности в щелочной среде. Это, в свою очередь, облегчало растворение  $TiO_2$  и инициировало перестройку его кристаллической решетки. Совокупный анализ, основанный на данных ИК-Фурье спектроскопии, РСА и рамановской спектроскопии, наглядно демонстрирует эффективность синергетического подхода, заключающегося в сочетании ультразвуковой обработки на предварительном этапе с последующим гидротермальным синтезом, для целенаправленного управления степенью кристалличности, наноразмерной морфологией и фазовым составом материала. Полученные результаты подчеркивают высокую перспективность синтеза титановых нанотрубок как функциональных материалов для применения в передовых технологических областях, требующих высокой структурной упорядоченности и стабильных фазовых характеристик.

### СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Wang B., Xue D., Shi Y., Xue F. Titania 1D nanostructured materials: synthesis, properties and applications // *Nanorods, nanotubes and nanomaterials research progress*. 2008. Pp. 163–201. EDN SRGJZJ.
2. Ubaid F., Naeem N., Shakoor R.A., Kahraman R., Mansour S., Zekri A. Effect of concentration of DOC loaded  $TiO_2$  nanotubes on the corrosion behavior of smart coatings // *Ceramics International*. 2019. No. 45 (8). Pp. 10492–10500. DOI: 10.1016/j.ceramint.2019.02.111
3. Mehmood U., Hussein I.A., Harrabi K., Mekki M.B., Ahmed S., Tabet N. Hybrid  $TiO_2$ -multiwall carbon nanotube (MWCNTs) photoanodes for efficient dye sensitized solar cells (DSSCs) // *Solar Energy Materials and Solar Cells*. 2015. No. 140. Pp. 174–179. DOI: 10.1016/j.solmat.2015.04.004
4. Ge M., Li Q., Cao C., Huang J., Li S., Zhang S. et al. One-dimensional  $TiO_2$  nanotube photocatalysts for solar water splitting // *Advanced science*. 2016. No. 4 (1). P. 1600152. DOI: 10.1002/advs.201600152
5. Jafari S., Mahyad B., Hashemzadeh H., Janfaza S., Gholikhani T., Tayebi L. Biomedical applications of  $TiO_2$  nanostructures: recent advances // *International journal of nanomedicine*. 2020. No. 2020 (15). Pp. 3447–3470. DOI: 10.2147/IJN.S249441
6. Raj C.C., Prasanth R. Advent of  $TiO_2$  nanotubes as supercapacitor electrode. *Journal of The Electrochemical Society*. 2018. No. 165 (9). Pp. 345–358. DOI: 10.1149/2.0561809jes. EDN YIVEHJ.
7. Vuong D.D., Tram D.T.N., Pho P.Q., Chien N.D. Hydrothermal synthesis and photocatalytic properties of  $TiO_2$  nanotubes // *In Physics and Engineering of New Materials*. Berlin, Heidelberg : Springer Berlin Heidelberg, 2009. No. 127. Pp. 95–101. DOI: 10.1007/978-3-540-88201-5\_11
8. Wang D., Zhou F., Liu Y., Liu W. Synthesis and characterization of anatase  $TiO_2$  nanotubes with uniform diameter from titanium powder // *Materials Letters*. 2008. No. 62 (12–13). Pp. 1819–1822. DOI: 10.1016/j.matlet.2007.10.011
9. Cui L., Hui K.N., Hui K.S., Lee S.K., Zhou W., Wan Z.P. et al. Facile microwave-assisted hydrothermal synthesis of  $TiO_2$  nanotubes // *Materials Letters*. 2012. No. 75. Pp. 175–178. DOI: 10.1016/j.matlet.2012.02.004
10. Victoria Dimas B., Hernández Pérez I., Febles V.G., Arceo L.D.B., Parra R.S., Rivera Olvera J.N. et al. Atomic-scale investigation on the evolution of  $TiO_2$ -anatase prepared by a sonochemical route and treated with NaOH // *Materials*. 2020. No. 13 (3). P. 685. DOI: 10.3390/ma13030685
11. Alkanad K., Hezam A., Al-Zaqri N., Bajiri M.A., Alnaggar G., Drmash Q.A. et al. One-step hydrothermal synthesis of anatase  $TiO_2$  nanotubes for efficient photocatalytic  $CO_2$  reduction // *ACS omega*. 2022. No. 7 (43). Pp. 38686–38699. DOI: 10.1021/acsomega.2c04211

12. Moreno M., Arredondo M., Ramasse Q.M., McLaren M., Stötzner P., Förster S. et al. ZnO nucleation into trititanate nanotubes by ALD equipment techniques, a new way to functionalize layered metal oxides // *Scientific Reports*. 2021. No. 11 (1). P. 7698. DOI: 10.1038/s41598-021-86722-0
13. El-Desoky M.M., Morad I., Wasfy M.H., Mansour A.F. Synthesis, structural and electrical properties of PVA/TiO<sub>2</sub> nanocomposite films with different TiO<sub>2</sub> phases prepared by sol–gel technique // *Journal of Materials Science: Materials in Electronics*. 2020. No. 31. Pp. 17574–17584. DOI: 10.1007/s10854-020-04313-7
14. Valeeva A.A., Dorosheva I.B., Sushnikova A.A. Influence of high energy milling on titanium oxide Ti<sub>3</sub>O<sub>5</sub> crystal structure // *Hanosystems: Physics, Chemistry, Mathematics*. 2023. No. 14 (1). Pp. 107–111. DOI: 10.17586/2220-8054-2023-14-1-107-111. EDN ZWDXYJ.
15. Ramanavicius S., Tereshchenko A., Karpicz R., Ratautaite V., Bubniene U., Maneikis A. et al. TiO<sub>2</sub>-x/TiO<sub>2</sub>-structure based ‘self-heated’ sensor for the determination of some reducing gases // *Sensors*. 2020. No. 20 (1). P. 74. DOI: 10.3390/s20010074
16. Ohtani B., Prieto-Mahaney O.O., Li D., Abe R. What is Degussa (Evonik) P25? Crystalline composition analysis, reconstruction from isolated pure particles and photocatalytic activity test // *Journal of Photochemistry and Photobiology A: Chemistry*. 2010. No. 216 (2–3). Pp. 179–182. DOI: 10.1016/j.jphotochem.2010.07.024
17. Dimitrijevic N.M., Saponjic Z.V., Rabatic B.M., Poluektov O.G., Rajh T. Effect of size and shape of nanocrystalline TiO<sub>2</sub> on photogenerated charges. An EPR study // *The Journal of Physical Chemistry C*. 2007. No. 111 (40). Pp. 14597–14601. DOI: 10.1021/jp0756395
18. Liao M.H., Hsu C.H., Chen D.H. Preparation and properties of amorphous titania-coated zinc oxide nanoparticles // *Journal of Solid State Chemistry*. 2006. No. 179 (7). Pp. 2020–2026. DOI: 10.1016/j.jssc.2006.03.042
19. Niu L., Zhao X., Tang Z., Lv H., Wu F., Wang X. et al. Difference in performance and mechanism for methylene blue when TiO<sub>2</sub> nanoparticles are converted to nanotubes // *Journal of Cleaner Production*. 2021. No. 297. P. 26498. DOI: 10.1016/j.jclepro.2021.126498
20. Mino L., Spoto G., Ferrar A.M. CO<sub>2</sub> capture by TiO<sub>2</sub> anatase surfaces: a combined DFT and FTIR study // *The Journal of Physical Chemistry C*. 2014. No. 118 (43). Pp. 25016–25026. DOI: 10.1021/jp507443k

## REFERENCES

1. Wang B., Xue D., Shi Y., Xue F. Titania 1D nanostructured materials: synthesis, properties and applications. *Nanorods, nanotubes and nanomaterials research progress*. 2008; 163–201. EDN SRGJZJ.
2. Ubaid F., Naeem N., Shakoor R.A., Kahraman R., Mansour S., Zekri A. Effect of concentration of DOC loaded TiO<sub>2</sub> nanotubes on the corrosion behavior of smart coatings. *Ceramics International*. 2019; 45(8):10492–10500. DOI: 10.1016/j.ceramint.2019.02.111
3. Mehmood U., Hussein I.A., Harrabi K., Mekki M.B., Ahmed S., Tabet N. Hybrid TiO<sub>2</sub>-multiwall carbon nanotube (MWCNTs) photoanodes for efficient dye sensitized solar cells (DSSCs). *Solar Energy Materials and Solar Cells*. 2015; 140:174–179. DOI: 10.1016/j.solmat.2015.04.004
4. Ge M., Li Q., Cao C., Huang J., Li S., Zhang S. et al. One-dimensional TiO<sub>2</sub> nanotube photocatalysts for solar water splitting. *Advanced science*. 2016; 4(1):1600152. DOI: 10.1002/advs.201600152
5. Jafari S., Mahyad B., Hashemzadeh H., Janfaza S., Gholikhani T., Tayebi L. Biomedical applications of TiO<sub>2</sub> nanostructures: recent advances. *International journal of nanomedicine*. 2020; 2020(15):3447–3470. DOI: 10.2147/IJN.S249441
6. Raj C.C., Prasanth R. Advent of TiO<sub>2</sub> nanotubes as supercapacitor electrode. *Journal of The Electrochemical Society*. 2018; 165(9):345–358. DOI: 10.1149/2.0561809jes. EDN YIVEHJ.
7. Vuong D.D., Tram D.T.N., Pho P.Q., Chien N.D. Hydrothermal synthesis and photocatalytic properties of TiO<sub>2</sub> nanotubes. In *Physics and Engineering of New Materials*. Berlin, Heidelberg, Springer Berlin Heidelberg, 2009; 127:95–101. DOI: 10.1007/978-3-540-88201-5\_11
8. Wang D., Zhou F., Liu Y., Liu W. Synthesis and characterization of anatase TiO<sub>2</sub> nanotubes with uniform diameter from titanium powder. *Materials Letters*. 2008; 62(12–13):1819–1822. DOI: 10.1016/j.matlet.2007.10.011
9. Cui L., Hui K.N., Hui K.S., Lee S.K., Zhou W., Wan Z.P. et al. Facile microwave-assisted hydrothermal synthesis of TiO<sub>2</sub> nanotubes. *Materials Letters*. 2012; 75:175–178. DOI: 10.1016/j.matlet.2012.02.004
10. Victoria Dimas B., Hernández Pérez I., Febles V.G., Arceo L.D.B., Parra R.S., Rivera Olvera J.N. et al. Atomic-scale investigation on the evolution of TiO<sub>2</sub>-anatase prepared by a sonochemical route and treated with NaOH. *Materials*. 2020; 13(3):685. DOI: 10.3390/ma13030685
11. Alkanad K., Hezam A., Al-Zaqri N., Bajiri M.A., Alnaggar G., Drmash Q.A. et al. One-step hydrothermal synthesis of anatase TiO<sub>2</sub> nanotubes for efficient photocatalytic CO<sub>2</sub> reduction. *ACS omega*. 2022; 7(43):38686–38699. DOI: 10.1021/acsomega.2c04211
12. Moreno M., Arredondo M., Ramasse Q.M., McLaren M., Stötzner P., Förster S. et al. ZnO nucleation into trititanate nanotubes by ALD equipment techniques, a new way to functionalize layered metal oxides. *Scientific Reports*. 2021; 11(1):7698. DOI: 10.1038/s41598-021-86722-0

13. El-Desoky M.M., Morad I., Wasfy M.H., Mansour A.F. Synthesis, structural and electrical properties of PVA/TiO<sub>2</sub> nanocomposite films with different TiO<sub>2</sub> phases prepared by sol-gel technique. *Journal of Materials Science: Materials in Electronics*. 2020; 31:17574-17584. DOI: 10.1007/s10854-020-04313-7
14. Valeeva A.A., Dorosheva I.B., Sushnikova A.A. Influence of high energy milling on titanium oxide Ti<sub>3</sub>O<sub>5</sub> crystal structure. *Nanosystems: Physics, Chemistry, Mathematics*. 2023; 14(1):107-111. DOI: 10.17586/2220-8054-2023-14-1-107-111. EDN ZWDXYJ.
15. Ramanavicius S., Tereshchenko A., Karpicz R., Ratautaite V., Bubniene U., Maneikis A. et al. TiO<sub>2</sub>-x/TiO<sub>2</sub>-structure based 'self-heated' sensor for the determination of some reducing gases. *Sensors*. 2020; 20(1):74. DOI: 10.3390/s20010074
16. Ohtani B., Prieto-Mahaney O.O., Li D., Abe R. What is Degussa (Evonik) P25? Crystalline composition analysis, reconstruction from isolated pure particles and photocatalytic activity test. *Journal of Photochemistry and Photobiology A: Chemistry*. 2010; 216(2-3):179-182. DOI: 10.1016/j.jphotochem.2010.07.024
17. Dimitrijevic N.M., Saponjic Z.V., Rabatic B.M., Poluektov O.G., Rajh T. Effect of size and shape of nanocrystalline TiO<sub>2</sub> on photogenerated charges. An EPR study. *The Journal of Physical Chemistry C*. 2007; 111(40):14597-14601. DOI: 10.1021/jp0756395
18. Liao M.H., Hsu C.H., Chen D.H. Preparation and properties of amorphous titania-coated zinc oxide nanoparticles. *Journal of Solid State Chemistry*. 2006; 179(7):2020-2026. DOI: 10.1016/j.jssc.2006.03.042
19. Niu L., Zhao X., Tang Z., Lv H., Wu F., Wang X. et al. Difference in performance and mechanism for methylene blue when TiO<sub>2</sub> nanoparticles are converted to nanotubes. *Journal of Cleaner Production*. 2021; 297:126498. DOI: 10.1016/j.jclepro.2021.126498
20. Mino L., Spoto G., Ferrar A.M. CO<sub>2</sub> capture by TiO<sub>2</sub> anatase surfaces: a combined DFT and FTIR study. *The Journal of Physical Chemistry C*. 2014; 118(43):25016-25026. DOI: 10.1021/jp507443k

Поступила 18.04.2025, после доработки 16.06.2025;

Принята к публикации 23.06.2025

Received April 18, 2025; Received in revised form June 16, 2025;

Accepted June 23, 2025

### Информация об авторах

**ВАН Зунг Ву**, аспирант кафедры «Технология конструкционных материалов», Московский автомобильно-дорожный государственный технический университет (МАДИ), Россия, 125319, г. Москва, Ленинградский пр-т, 64; ORCID: 0009-0000-0660-0144; e-mail: vandungph2605@gmail.com

**ХЮ Бач Нгуен**, студент факультета «Энерго-экологический», Московский автомобильно-дорожный государственный технический университет (МАДИ), Россия, 125319, г. Москва, Ленинградский пр-т, 64; ORCID: 0009-0008-4597-7567; e-mail: huybach484@gmail.com

**НИГМЕТЗЯНОВ Равиль Исламович**, к.т.н., доцент кафедры «Технология конструкционных материалов», Московский автомобильно-дорожный государственный технический университет (МАДИ), Россия, 125319, г. Москва, Ленинградский пр-т, 64; ORCID: 0009-0008-1443-7584; e-mail: lefmo@yandex.ru

#### Вклад авторов:

**Ван Зунг Ву** — концептуализация; обработка данных; исследование; методология; написание — первоначальный вариант.

**Хю Бач Нгуен** — концептуализация; обработка данных; визуализация.

**Нигметзянов Р.И.** — концептуализация; методология; редактирование.

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

### Information about the authors

**Zung Vu VAN**, postgraduate student of the Department "Technology of structural materials", Moscow Automobile and Road Construction State Technical University (MADI), Leningradskiy Prospekt, 64, Moscow, 125319, Russian Federation; ORCID: 0009-0000-0660-0144; e-mail: vandungph2605@gmail.com

**Bach Nguyen HUY**, student of the Faculty of Energy and Ecology, Moscow Automobile and Road Construction State Technical University (MADI), Leningradskiy Prospekt, 64, Moscow, 125319, Russian Federation; ORCID: 0009-0008-4597-7567; e-mail: huybach484@gmail.com

**Ravil I. NIGMETZYANOV**, Cand. Sci. (Eng.), Associate Professor, Department of "Technology of Structural Materials", Moscow Automobile and Road Construction State Technical University (MADI), Leningradskiy Prospekt, 64, Moscow, 125319, Russian Federation; ORCID: 0009-0008-1443-7584; e-mail: lefmo@yandex.ru

#### Contribution of the authors:

**Van Zung Vu** — conceptualization; data processing; research; methodology; writing — initial version.

**Huy Bach Nguyen** — conceptualization; data processing; visualization.

**Nigmatzyanov R.I.** — conceptualization; methodology; editing.

The authors declare no conflicts of interests.

## Проблемы обеспечения воспроизводимости измерений в системе стандартов пожарной безопасности: Метод II ГОСТ 30244

Евгений Юрьевич Полищук<sup>1</sup>, Евгений Юрьевич Круглов<sup>2</sup>,  
Вадим Александрович Кудряшов<sup>3</sup>, Владислав Сергеевич Шоя<sup>4</sup>,  
Марина Викторовна Гравит<sup>5</sup>, Ирина Леонидовна Котлярская<sup>5</sup>✉

<sup>1</sup> СБЕ ПМИПИР ГК ТехноНИКОЛЬ, г. Москва, Россия

<sup>2</sup> 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

<sup>3</sup> Научно-исследовательское республиканское унитарное предприятие по строительству «Институт БелНИИС», г. Минск, Республика Беларусь

<sup>4</sup> СБЕ ПМИПИР ГК ТехноНИКОЛЬ, г. Рязань, Россия

<sup>5</sup> Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого, г. Санкт-Петербург, Россия

### АННОТАЦИЯ

**Введение.** Правильная оценка пожарной опасности строительных материалов — это критичный этап проектирования и эксплуатации зданий. Так как все больше в интерьере и экстерьере зданий используются клееные слоистые древесные материалы, такие как фанера, важно определить их поведение во время пожара.

**Объект и предмет исследования.** В качестве объекта исследования были отобраны образцы трудногорючей фанеры. Предметом исследования является определение группы горючести данного материала. **Цель исследования.** Целью работы является оценка воспроизводимости испытаний, проводимых в различных испытательных лабораториях, на примере показателя горючести трудногорючей фанеры и разработки рекомендаций по совершенствованию методических подходов.

**Материалы и метод исследования.** Определение группы горючести трудногорючей фанеры проводилось в 10 аккредитованных лабораториях согласно ГОСТ 30244–94 «Материалы строительные. Методы испытаний на горючесть». Исследованию подлежали следующие характеристики: температура дымовых газов, площадь повреждения поверхности, потеря массы образцом и время самостоятельного горения.

**Результаты и их обсуждение.** Существующая методика определения группы горючести несовершенна и не обеспечивает воспроизводимости результатов измерений. Предлагаемые изменения в ГОСТ 30244–94 (стандартизация газа, держателей, калибровки) не решают проблему отсутствия корреляции между параметрами испытаний и физико-химией горения. Показатель «повреждения» неинформативен. Необходимо оценивать тепловыделение, скорость распространения пламени, токсичность газов и другие параметры, характеризующие особенности реакции горения. Современные показатели горючести и классы пожарной опасности не отражают фактического участия материалов в развитии пожаров и не могут использоваться для параметрического противопожарного нормирования или прогнозирования развития пожара с использованием инструментов моделирования. Одним из первоочередных шагов по преодолению существующих проблем может стать разработка единого классификационного стандарта, основанного на комплексной оценке этих параметров.

**Выводы.** Отсутствие воспроизводимости результатов в различных аккредитованных лабораториях указывает на необходимость пересмотра и совершенствования нормативной базы.

**Ключевые слова:** строительные материалы; трудногорючая фанера; огонь; негорючесть; горючесть; методы испытаний; пожарная безопасность

**Для цитирования:** Полищук Е.Ю., Круглов Е.Ю., Кудряшов В.А., Шоя В.С., Гравит М.В., Котлярская И.Л. Проблемы обеспечения воспроизводимости измерений в системе стандартов пожарной безопасности: Метод II ГОСТ 30244 // Пожаровзрывобезопасность/Fire and Explosion Safety. 2025. Т. 34. № 4. С. 14–31. DOI: 10.22227/0869-7493.2025.34.04.14-31

✉ Котлярская Ирина Леонидовна, e-mail: iravassilek@mail.ru

# Problems of ensuring reproducibility of measurements in the system of fire safety standards: Method II GOST 30244

Evgeny Yu. Polishchuk<sup>1</sup>, Evgeny Yu. Kruglov<sup>2</sup>, Vadim A. Kudryashov<sup>3</sup>, Vladislav S. Shoya<sup>4</sup>, Marina V. Gravit<sup>5</sup>, Irina L. Kotlyarskaya<sup>5</sup>✉

<sup>1</sup> SBE PMiPIR TechnoNICOL Group, Moscow, Russian Federation

<sup>2</sup> All-Russian Research Institute for Fire Protection of Ministry of Russian Federation for Civil Defence, Emergencies and Elimination of Consequences of Natural Disasters, Balashikha, Moscow Region, Russian Federation

<sup>3</sup> Research and Development Republican Unitary Enterprise for Construction BelNIIS Institute, Minsk, Republic of Belarus

<sup>4</sup> SBE PMiPIR TechnoNICOL Group, Ryazan', Russian Federation

<sup>5</sup> Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University, Saint Petersburg, Russian Federation

## ABSTRACT

**Introduction.** Proper assessment of the fire hazard of building materials is a critical stage in the design and operation of buildings. As glued laminated wood materials such as plywood are increasingly used in the interior and exterior of buildings, it is important to determine their behaviour during a fire.

**The object and subject of the study.** Specimens of flame-retardant plywood were selected as the object of the study. The subject of the study is the determination of the flammability group of this material.

**The aim of the work.** The aim of the work is to assess the convergence of test results conducted in various testing laboratories, using the example of the flammability index of hard-to-burn plywood and to develop recommendations for improving methodological approaches.

**Materials and research method.** The determination of the flammability group of refractory plywood was carried out in 10 accredited laboratories in accordance with GOST 30244–94 “Building materials. Methods of testing for flammability”. The following characteristics were investigated: flue gas temperature, surface damage area, mass loss by the specimen, and self-combustion time.

**Results and discussion.** The existing methodology for determining the flammability group does not ensure the reproducibility of measurement results. The proposed changes to GOST 30244–94 (standardization of gas, holders, calibrations) do not solve the problem of the lack of correlation between the test parameters and the physico-chemistry of combustion. The “damage” indicator is uninformative. It is necessary to evaluate heat generation, flame propagation velocity, gas toxicity, and other fire hazard parameters. Current flammability indicators and fire hazard classes do not reflect the actual danger of materials and cannot be used for fire safety rationing or fire development forecasting. One of the first steps to overcome existing problems may be the development of a unified classification standard based on a comprehensive assessment of these parameters.

**Conclusions.** The lack of reproducibility of results in different accredited laboratories indicates the need to revise and improve the regulatory framework.

**Keywords:** building materials; hard-to-burn plywood; fire; incombustibility; combustibility; test methods; fire safety

**For citation:** Polishchuk E.Yu., Kruglov E.Yu., Kudryashov V.A., Shoya V.S., Gravit M.V., Kotlyarskaya I.L. Problems of ensuring reproducibility of measurements in the system of fire safety standards: Method II GOST 30244. *Pozharovzryvobezopasnost/Fire and Explosion Safety*. 2025; 34(4):14-31. DOI: 10.22227/0869-7493.2025.34.04.14-31 (rus).

✉ Irina Leonidovna Kotlyarskaya, e-mail: iravassilek@mail.ru

## Введение

Сфера архитектуры и дизайна интерьера активно развивается: проектируются и возводятся более крупные и многофункциональные объекты, на строительном рынке постоянно появляются инновационные материалы и возникают более передовые технологии, например аэрогель [1–3], графен [4, 5], углеродные нанотрубки [6, 7], самовосстанавливающиеся материалы [8, 9], 3D-печать зданий [10], лазерное сканирование зданий [11, 12], модульное строительство [13, 14], использование робототехники [15–17] и т.д. Стремление к экологическому и устойчивому развитию диктует учет таких аспектов, как энергоэффективность, использование возобновляемых материалов и снижение негативного воздействия на окружающую среду при разработке и строитель-

стве зданий [18–20]. Несмотря на обилие композиционных материалов и наноматериалов, отчетливо прослеживается тенденция и к применению натуральных материалов (древесина, камень, металл, керамика), так как они позволяют почувствовать связь с природой, что особенно актуально и востребованно в мегаполисах. Одним из ключевых материалов, который активно используется в интерьере и экстерьере зданий, является древесина [21]. Она не только служит основным сырьем для производства мебели и строительных материалов, но и обладает способностью эффективно поглощать углекислый газ (CO<sub>2</sub>) [22].

Безопасность людей при пожарах напрямую зависит от времени блокирования путей эвакуации и эффективности мер предотвращения и прекращения распространения пожара на начальных эта-

пах, а эти факторы, в свою очередь, определяются поведением, в том числе, строительных материалов в условиях пожара. Необходимый уровень пожарной безопасности строительных материалов и изделий, в том числе деревянных, согласно п. 6 ст. 52 Федерального закона<sup>1</sup>, можно обеспечить с помощью огнезащитных составов (в том числе антипиренов). В соответствии с ГОСТ 12.1.033–81<sup>2</sup>, антипиренами являются вещества или смеси, добавляемые в материал (вещество) органического происхождения для снижения его горючести.

Массивная древесина обладает анизотропной природой, что создает трудность в ее равномерной пропитке огнезащитным составом. Чем толще пропитываемый сортимент, тем выше неравномерность пропитки. При обработке массивной древесины антипиреном в поверхностной зоне древесного материала его содержание всегда оказывается значительно больше, чем во внутренних зонах, в которых антипирен может даже и вовсе отсутствовать. У клееных слоистых древесных материалов, таких как фанера, неравномерность пропитки практически исключена. Слои древесного материала — шпоны — обычно изготавливаются малой толщины, и поэтому их можно достаточно легко и равномерно пропитать антипиреном до склеивания, а после их склеивания получается материал с равномерной огнезащитой по всему объему [23]. Выполненная по такому методу трудногорючая фанера используется в качестве конструктивных элементов в железнодорожных пассажирских вагонах, к которым предъявляются высокие требования по пожарной безопасности [24].

Правильная оценка пожарной опасности строительных материалов — это критичный этап проектирования и эксплуатации зданий. В работе [25] уточняется, что разнообразие методологических подходов к оценке пожарной опасности строительных материалов, в частности горючести, приводит к проблеме, препятствующей свободному перемещению товаров в международном сотрудничестве. Горючесть как ключевая пожарно-техническая характеристика определяется способностью материала к самостоятельному горению как с внешним источником тепла, так и без него. Неоднозначность результатов испытаний, как горючих, так и негорючих, создает путаницу и риски как для общества в целом (связаны с возможностью обращения фальсифицированной продукции), так и для произ-

водителей (связаны с возможностью предъявления необоснованных претензий к качеству продукции, потребительскому экстремизму). Проблема гармонизации, унификации и стандартизации отечественных и международных стандартов по испытанию материалов также отражена в работах [26, 27].

Одним из ключевых вопросов верификации результатов исследований с использованием стандартных методов является вопрос выбора эталонного образца или образца сравнения.

В рамках работы в качестве объекта исследования (образца сравнения) были отобраны образцы трудногорючей фанеры, характеризующиеся высокой степенью предсказуемости поведения в процессе огневого воздействия. Предметом исследования является определение группы горючести данного материала в соответствии с ГОСТ 30244–94<sup>3</sup>.

Целью работы является оценка воспроизводимости результатов огневых испытаний, проводимых в различных испытательных лабораториях, на примере показателя горючести трудногорючей фанеры и разработки рекомендаций по совершенствованию методических подходов к оценке реакции строительных материалов к воздействию огня.

Образцы фанеры дополнительно были испытаны на установке ВСМ (установка для определения воспламеняемости) по ГОСТ 30402–96<sup>4</sup> при воздействии стандартизованных тепловых потоков 5, 10, 15, 20 кВт/м<sup>2</sup>, время воздействия при этом соответствовало продолжительности испытаний по ГОСТ<sup>3</sup> и составляло 10 мин.

### Материалы и метод исследования

Для исследования были отобраны 12 образцов трудногорючей фанеры (АО «Фанерный завод «Власть труда», Московская область) из одной партии. Размер каждого образца составляет 1000 × 190 × 10 мм.

Метод испытания горючих строительных материалов для определения их групп горючести применяют и для однородных, и для слоистых горючих строительных материалов. Испытания проводились специалистами 10 аккредитованных лабораторий, а также заводской лабораторией в рамках, определенных стандартом ГОСТ<sup>3</sup> и регламентами работы лаборатории.

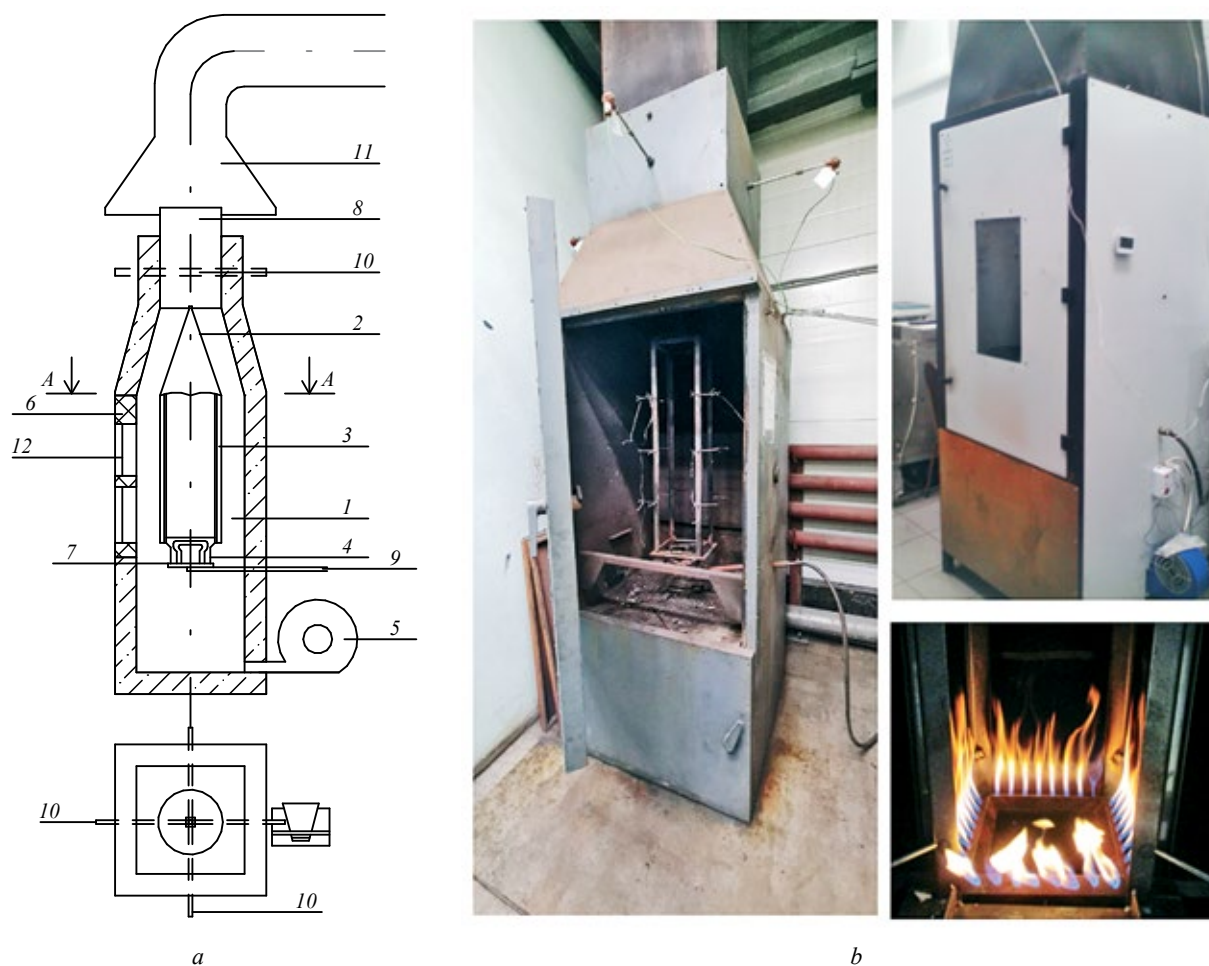
Установка для испытания состоит из камеры сжигания, системы подачи воздуха в камеру сжигания, газоотводной трубы, вентиляционной системы для удаления продуктов сгорания (рис. 1).

<sup>1</sup> Технический регламент о требованиях пожарной безопасности : ФЗ № 123 от 22.07.2008.

<sup>2</sup> ГОСТ 12.1.033–81. Система стандартов безопасности труда. Пожарная безопасность. Термины и определения (с Изменением № 1).

<sup>3</sup> ГОСТ 30244–94. Материалы строительные. Методы испытаний на горючесть.

<sup>4</sup> ГОСТ 30402–96. Материалы строительные. Метод испытания на воспламеняемость.



**Рис. 1.** Общий вид установки: *a* — схематичный вид: 1 — камера сжигания; 2 — держатель образца; 3 — образец; 4 — газовая горелка; 5 — вентилятор подачи воздуха; 6 — дверца камеры сжигания; 7 — диафрагма; 8 — вентиляционная труба; 9 — газопровод; 10 — термопары; 11 — вытяжной зонтик; 12 — смотровое окно; *b* — фото установки

**Fig. 1.** General view of the installation: *a* — schematic view, where 1 — combustion chamber; 2 — specimen holder; 3 — specimen; 4 — gas burner; 5 — air supply fan; 6 — combustion chamber door; 7 — diaphragm; 8 — ventilation pipe; 9 — gas pipeline; 10 — thermocouples; 11 — exhaust umbrella; 12 — viewing window; *b* — installation photo

В каждой лаборатории проводилось три испытания трудногорючей фанеры. В каждом из трех испытаний одновременно испытывалось по четыре образца материала.

Согласно стандарту ГОСТ<sup>3</sup>, основными критериями отнесения материалов к различным группам

горючести являются следующие характеристики: температура дымовых газов, площадь повреждения поверхности, потеря массы образцом и время самостоятельного горения. Показатель горючести строительных материалов определяется в соответствии с требованиями табл. 1.

**Таблица 1.** Критерии соответствия группы горючести по ГОСТ<sup>3</sup>  
**Table 1.** Criteria for compliance with the flammability group according to GOST<sup>3</sup>

| Группа горючести материалов<br>The flammability group of materials | Параметры горючести<br>Flammability parameters                      |  |  |   |
|--|---|--|--|---|
|  | Температура дымовых газов $T$ , °C<br>Flue gas temperature $T$ , °C | Степень повреждения по длине $S_L$ , %<br>Degree of damage in length $S_L$ , % | Степень повреждения по массе $S_m$ , %<br>Degree of damage by mass $S_m$ , % | Продолжительность самостоятельного горения $t_{c,sp}$ , с<br>Duration of self-combustion $t_{c,sp}$ , s |
| Г1 / G1  | ≤ 135   | ≤ 65   | ≤ 20   | 0   |
| Г2 / G2  | ≤ 235   | ≤ 85   | ≤ 50   | ≤ 30  |
| Г3 / G3  | ≤ 450   | > 85   | ≤ 50   | ≤ 300   |
| Г4 / G4  | > 450   | > 85   | > 50   | > 300   |

## Результаты испытаний

Результаты испытаний, зафиксированные в протоколах, представлены в табл. 2. Сводные данные по результатам испытаний — в табл. 3.

Значения измеряемых параметров для серии 3 (образец № 1–4) в лаборатории № 2 значительно отличаются от значений измеряемых параметров серии 1 и 2, соответственно, необходимо проверить массив

Таблица 2. Результаты испытаний трудногорючей фанеры  
Table 2. Test results of hard-to-burn plywood

| Лаборатория, номер<br>Laboratory, number | Номер серии испытаний<br>Test series number | Температура дымовых газов, °C<br>Flue gas temperature, °C | Степень повреждения образцов по длине, %<br>The degree of damage to the specimens by length, % |    |    |    | Потеря массы, %<br>Weight loss, % | Время самостоятельного горения, с<br>Self-burning time, s | Группа горючести<br>Flammability group |
|--|---|---|--|----|----|----|-----------------------------------|---|--|
|  |   |   |  |    |    |    |                                   |   |  |
| 1  | 1   | 96  | 43   | 49 | 38 | 41 | 9                                 | 0   | Г1 / G1                                |
|  | 2   | 91  | 44   | 43 | 47 | 42 | 8                                 | 0   |  |
|  | 3   | 94  | 48   | 45 | 44 | 39 | 8                                 | 0   |  |
|  | Среднее<br>Average                          | 94  | 44   |    |    |    | 8                                 | 0   |  |
| 2  | 1   | 94  | 43   | 41 | 39 | 44 | 10                                | 0   | Г2 / G2                                |
|  | 2   | 100   | 48   | 48 | 43 | 43 | 12                                | 0   |  |
|  | 3   | 117   | 67   | 56 | 55 | 57 | 17                                | 37  |  |
|  | Среднее<br>Average                          | 104   | 49   |    |    |    | 13                                | 12  |  |
| 3  | 1   | 81  | 29   | 10 | 31 | 41 | 5                                 | 0   | Г1 / G1                                |
|  | 2   | 94  | 42   | 37 | 32 | 44 | 7                                 | 0   |  |
|  | 3   | 91  | 40   | 35 | 38 | 42 | 6                                 | 0   |  |
|  | Среднее<br>Average                          | 89  | 35   |    |    |    | 6                                 | 0   |  |
| 4  | 1   | 118   | 19   | 19 | 22 | 23 | 5                                 | 0   | Г1 / G1                                |
|  | 2   | 120   | 34   | 30 | 28 | 32 | 9                                 | 0   |  |
|  | 3   | 117   | 22   | 25 | 28 | 24 | 6                                 | 0   |  |
|  | Среднее<br>Average                          | 118   | 26   |    |    |    | 7                                 | 0   |  |
| 5  | 1   | 107   | 43   | 37 | 41 | 42 | 6                                 | 0   | Г1 / G1                                |
|  | 2   | 110   | 44   | 45 | 39 | 39 | 7                                 | 0   |  |
|  | 3   | 105   | 42   | 37 | 40 | 38 | 6                                 | 0   |  |
|  | Среднее<br>Average                          | 107   | 41   |    |    |    | 6                                 | 0   |  |
| 6  | 1   | 101   | 39   | 32 | 34 | 33 | 5                                 | 0   | Г1 / G1                                |
|  | 2   | 97  | 30   | 22 | 26 | 30 | 5                                 | 0   |  |
|  | 3   | 102   | 30   | 38 | 34 | 28 | 7                                 | 0   |  |
|  | Среднее<br>Average                          | 100   | 31   |    |    |    | 6                                 | 0   |  |

Окончание табл. 2 / End of the Table 2

| Лаборатория, номер<br>Laboratory, number                                   | Номер серии испытаний<br>Test series number | Температура дымовых газов, °C<br>Flue gas temperature, °C | Степень повреждения образцов по длине, %<br>The degree of damage to the specimens by length, % |    |    |    | Потеря массы, %<br>Weight loss, % | Время самостоятельного горения, с<br>Self-burning time, s | Группа горючести<br>Flammability group |
|--|---|---|--|----|----|----|-----------------------------------|---|--|
|  |   |   |  |    |    |    |                                   |   |  |
| 7  | 1   | 96  | 53*  |    |    |    | 18                                | 0   | Г1 / G1                                |
|  | 2   | 94  | 52*  |    |    |    | 18                                | 0   |  |
|  | 3   | 97  | 55*  |    |    |    | 17                                | 0   |  |
|  | Среднее<br>Average                          | 96  | 53   |    |    |    | 18                                | 0   |  |
| 8  | 1   | 112   | 37   | 36 | 37 | 36 | 9                                 | 0   | Г1 / G1                                |
|  | 2   | 109   | 37   | 37 | 36 | 37 | 9                                 | 0   |  |
|  | 3   | 110   | 38   | 37 | 36 | 35 | 9                                 | 0   |  |
|  | Среднее<br>Average                          | 110   | 37   |    |    |    | 9                                 | 0   |  |
| 9  | 1   | 119   | 20   | 21 | 18 | 20 | 6                                 | 0   | Г1 / G1                                |
|  | 2   | 117   | 19   | 22 | 23 | 25 | 7                                 | 0   |  |
|  | 3   | 120   | 18   | 20 | 26 | 27 | 7                                 | 0   |  |
|  | Среднее<br>Average                          | 119   | 22*  |    |    |    | 7                                 | 0   |  |
| 10   | 1   | 109   | 42*  |    |    |    | 11                                | 0   | Г1 / G1                                |
|  | 2   | 110   | 40*  |    |    |    | 10                                | 0   |  |
|  | 3   | 117   | 40*  |    |    |    | 12                                | 0   |  |
|  | Среднее<br>Average                          | 112   | 41   |    |    |    | 11                                | 0   |  |
| Лаборатория завода «ЛоджикруфПИР»<br>Laboratory of the Logicroof PIR Plant | 1   | 110   | 21   | 25 | 21 | 21 | 9                                 | 0   | Г1 / G1                                |
|  | 2   | 103   | 23   | 30 | 25 | 32 | 9                                 | 0   |  |
|  | 3   | 104   | 30   | 25 | 29 | 29 | 10                                | 0   |  |
|  | Среднее<br>Average                          | 106   | 26   |    |    |    | 9                                 | 0   |  |

\* В протоколе отсутствуют сведения по длине повреждения отдельных образцов.  
\* The protocol does not contain information on the length of damage to individual specimens.

Таблица 3. Сводные данные по результатам испытаний  
Table 3. Summary of test results

| Характеристика<br>Characteristic<br>Значение<br>Value | Температура дымовых газов, °C<br>Flue gas temperature, °C | Средние повреждения по длине, %<br>Average damage in length, % | Потеря массы, %<br>Weight loss, % | Время самостоятельного горения, с<br>Self-burning time, s | Общая характеристика<br>General characteristics |
|---|---|--|-----------------------------------|---|---|
| Максимальное значение<br>Maximum value                | 120   | 67   | 18                                | 37  | Г2 / G2   |
| Среднее<br>Average                                    | 104,8   | 34   | 9                                 | 1   |   |
| Минимальное значение<br>Minimal value                 | 81  | 19   | 5                                 | 0   |   |
| Среднее отклонение<br>Average deviation               | 10,6  | 8,6  | 2,7                               | 2,2   |   |

**Таблица 4.** Расчет критерия Граббса  
**Table 4.** Calculation of the Grubbs criterion

| Измеряемые параметры<br>Measured parameters |   |  |                         |                         |                         |                                   |   |
|---|---|--|-------------------------|-------------------------|-------------------------|-----------------------------------|---|
| <i>i</i>                                    | Температура дымовых газов, °С<br>Flue gas temperature, °C | Степень повреждения образцов по длине, %<br>The degree of damage to the samples by length, % |                         |                         |                         | Потеря массы, %<br>Weight loss, % | Время самостоятельного горения, с<br>Self-burning time, s |
|   |   | Образец 1<br>Specimen 1  | Образец 2<br>Specimen 2 | Образец 3<br>Specimen 3 | Образец 4<br>Specimen 4 |                                   |   |
| 1   | 94  | 43   | 41                      | 39                      | 44                      | 10                                | 0   |
| 2   | 100   | 48   | 48                      | 43                      | 43                      | 12                                | 0   |
| 3   | 117   | 67   | 56                      | 55                      | 57                      | 17                                | 37  |
| <i>n</i>                                    | 3   | 3  | 3                       | 3                       | 3                       | 3                                 | 3   |
| <i>x</i>                                    | 103,66  | 52,66  | 48,33                   | 45,66                   | 48                      | 13                                | 42,66   |
| <i>S</i>                                    | 11,9  | 12,66  | 7,5                     | 8,32                    | 7,8                     | 3,6                               | 5,5   |
| <i>G</i> <sub>3</sub>                       | 1,117   | 1,131  | 1,02                    | 1,12                    | 1,152                   | 1,109                             | 0,968   |

данных на наличие грубых погрешностей, для этого воспользуемся критерием Граббса и рассчитаем его в соответствии с ГОСТ Р 8.736–2011<sup>5</sup>. Для каждого измеряемого параметра найдем среднее арифметическое значение  $\bar{x}$ , среднее квадратическое отклонение *S* и критерий Граббса *G*<sub>1</sub> по формулам (1–3):

$$\bar{x} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n x_i; \quad (1)$$

$$S = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2}{n-1}}; \quad (2)$$

$$G_1 = \frac{|x_{\max} - \bar{x}|}{S}, \quad (3)$$

где *x*<sub>*i*</sub> — это *i*-й результат измерения; *n* — число измерений.

В табл. 4 представлены значения для расчета критерия Граббса.

Если значение критерия Граббса *G*<sub>3</sub> больше критического значения критерия Граббса *G*<sub>*m*</sub>, то такое измерение исключается как маловероятное. Согласно ГОСТ<sup>5</sup>, для трех измерений *G*<sub>*m*</sub> = 1,155, что больше полученных значений. Таким образом, все измеренные ранее значения параметров для серии 3 (образец № 1–4) в лаборатории № 2 являются вероятными и не подвергаются исключению.

Согласно данным измерениям, трудногорючую фанеру следует отнести к группе горючести Г2. Однако эти измерения основываются на наличии визуально фиксируемых признаках самостоятель-

ного горения. Визуальные признаки можно отнести к субъективным, индивидуальным, и поэтому данный критерий является одним из наиболее спорных при обсуждении классификации материалов по горючести. Согласно другим классификационным показателям, данный материал также может быть отнесен к группе Г1.

При анализе полученных результатов стоит обратить внимание на данные, предоставленные лабораториями № 2 и 4. В лаборатории № 2 зафиксированы максимальные значения повреждений по длине и по потере в массе образцов, однако температура дымовых газов оказалась на уровне средних значений. В лаборатории № 4, напротив, были зарегистрированы максимальные температуры дымовых газов, но при этом повреждения образцов по длине оказались минимальными.

Таким образом, несмотря на то, что в каждой из лабораторий общая характеристика материала по численным показателям совпадает и соответствует группе горючести Г1, первичный анализ данных, представленных в табл. 2, указывает на отсутствие корреляции между результатами объективного контроля (измерение температуры дымовых газов) и результатами измерений, проводимых вручную. Это подтверждается графическим анализом, выполненным с использованием программного обеспечения Excel, на котором видно, что максимальная величина температуры дымовых газов не всегда соответствует максимальным значениям повреждений образцов (рис. 2). Статистический анализ в программе Excel основывается на вычислении коэффициента детерминации *R*<sup>2</sup> (*R*-квадрат), который, в свою очередь, основывается на коэффициенте корреляции Пирсона *R*. Статистический инструмент *R*, который определяет силу и направление линейной

<sup>5</sup> ГОСТ Р 8.736–2011. Государственная система обеспечения единства измерений. Измерения прямые многократные. Методы обработки результатов измерений. Основные положения.

связи между двумя непрерывными переменными  $x$  и  $y$ , определяется по формуле (4) [28]:

$$R(x, y) = \frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})(y_i - \bar{y})}{\sqrt{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2} \sqrt{\sum_{i=1}^n (y_i - \bar{y})^2}}, \quad (4)$$

где  $x$  и  $y$  — две сравниваемые переменные;  
 $n$  — количество точек данных.

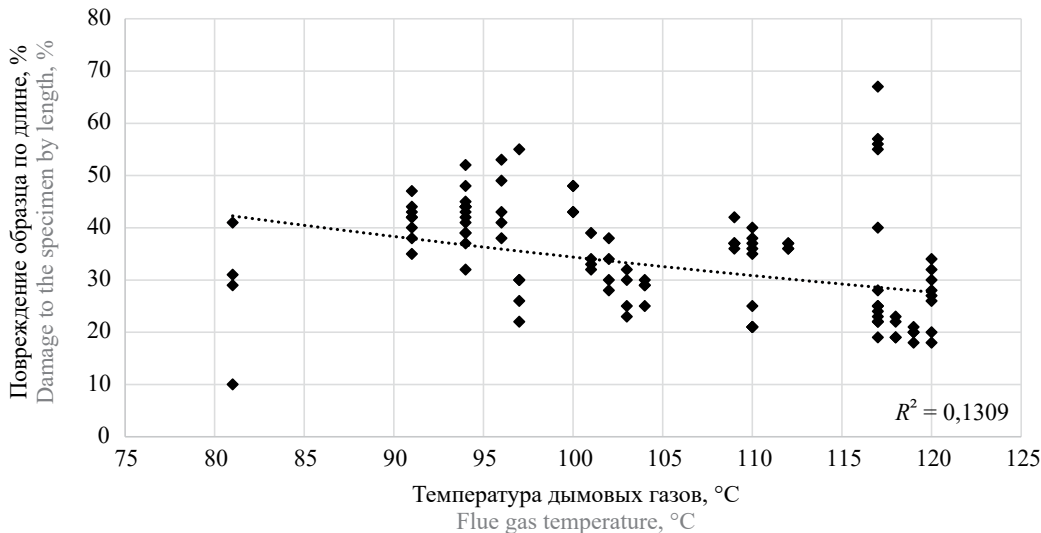
Значение  $R$  варьируется от «-1», означающего отрицательную корреляцию, до «1» — идеальная корреляция. В теории вероятности достоверность определенного события также обозначается «1», а вероятность невозможного события равна «0» [29].

Коэффициент детерминации для пары «Температура дымовых газов – Длина повреждений», согласно расчетам Excel, не превышает 0,1136 (рис. 2). Коэффициент корреляции составляет  $R = 0,337$ , что говорит о крайне низкой корреляции.

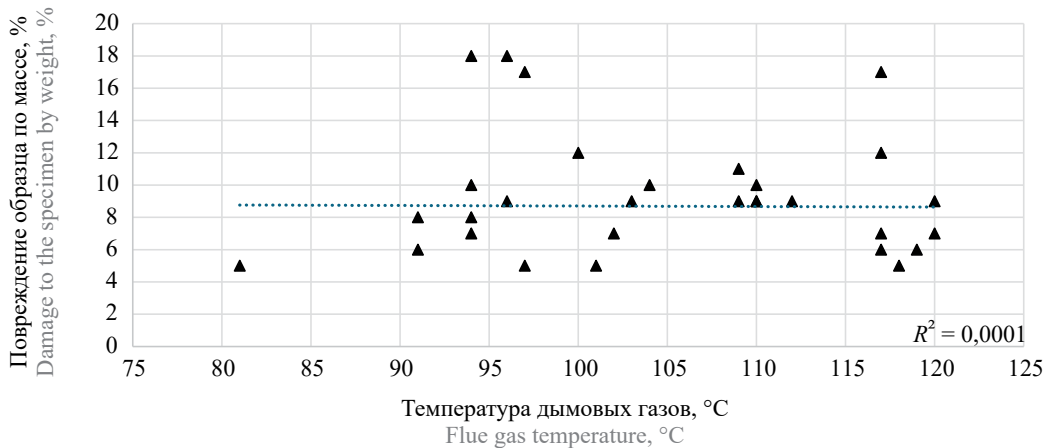
Аналогично рассчитан коэффициент детерминации для пары «Температура дымовых газов – Потеря массы» (рис. 3), он не превышает 0,0032. Коэффициент корреляции составляет  $R = 0,0056$ , что говорит об отсутствии корреляции.

По результатам проведенных исследований не коррелируются также данные в паре «Длина повреждения – Потеря массы» (рис. 4). Согласно расчетам Excel, коэффициент детерминации не превышает 0,7006. Коэффициент корреляции составляет  $R = 0,49$ .

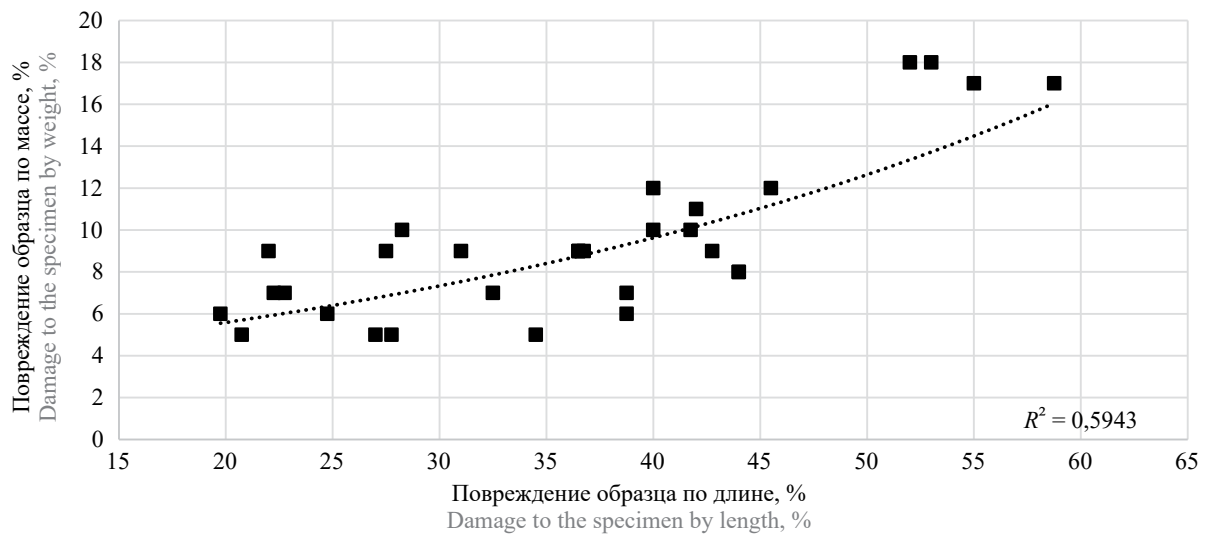
Использование труднгорючей фанеры в качестве стандартного образца при испытаниях по Методу П<sup>3</sup> обладает значительным преимуществом: высокой предсказуемостью реакции материала на воздействие пламени. Соответственно, анализ визуальных характеристик обугленных образцов труднгорючей фанеры, таких как глубина обугливания, характер и расположение трещин, образование деформаций, позволяет идентифицировать особенности работы конкретной



**Рис. 2.** Результаты сопоставления зависимостей повреждения образцов по длине от температуры дымовых газов  
**Fig. 2.** The results of comparing the dependences of specimen damage in length on flue gas temperature



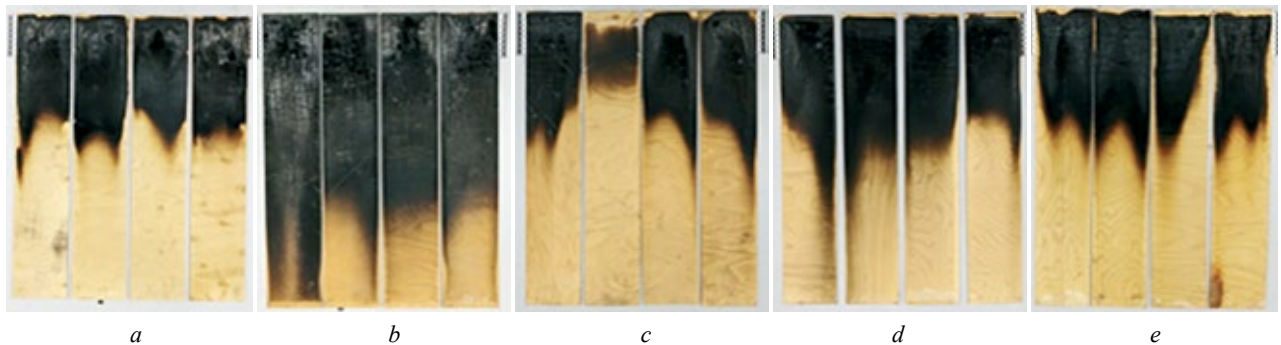
**Рис. 3.** Результаты сопоставления зависимостей повреждения образцов по массе от температуры дымовых газов  
**Fig. 3.** The results of comparing the dependences of damage to specimens by weight on the temperature of flue gases



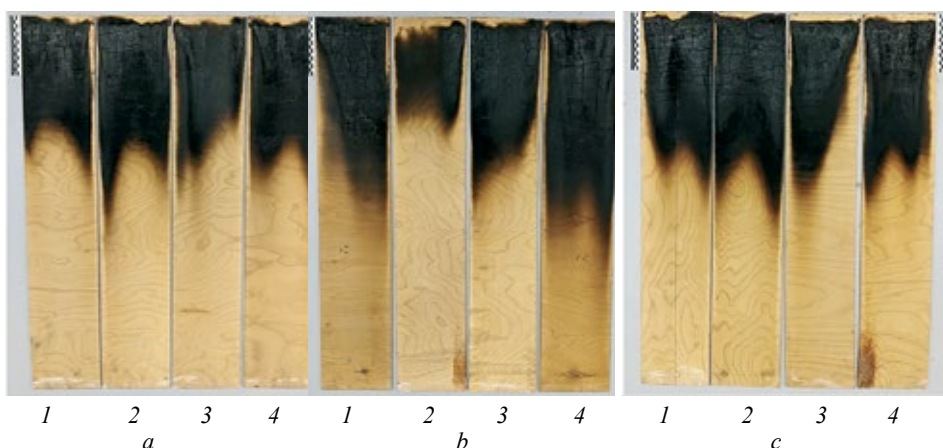
**Рис. 4.** Результат сопоставления данных лабораторий по повреждениям образцов  
**Fig. 4.** The result of comparing laboratory data on specimen damage

установки и сравнивать результаты испытаний, проводимых в разных лабораториях. Наличие таких «отпечатков» демонстрируют фотографии образцов (рис. 5), позволяющие визуально сравнить результаты испытаний, проведенных в различных лабораториях.

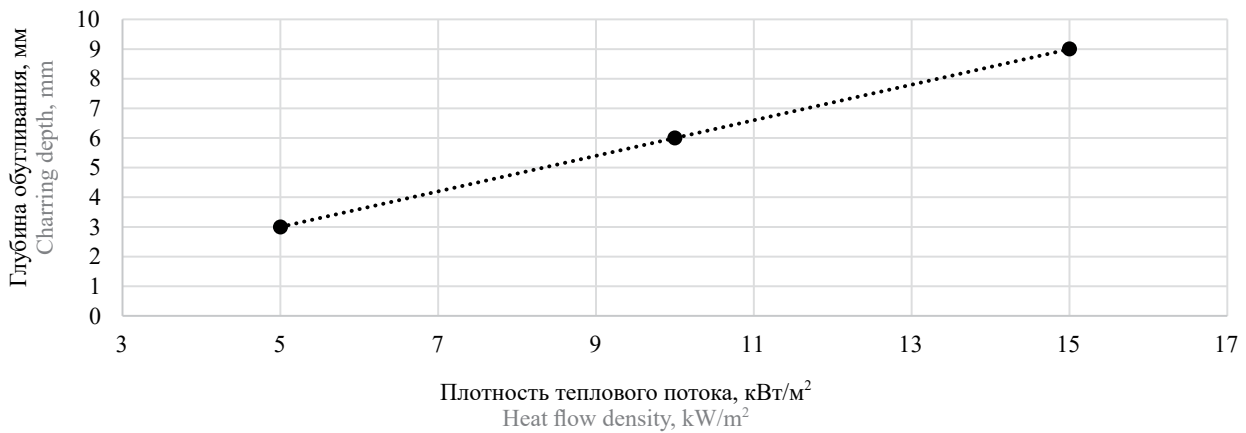
Однако парадоксальным является тот факт, что даже при использовании одной и той же печи и одинаковых образцов результаты испытаний могут значительно различаться. Анализ результатов испытаний в лаборатории 6, представленный на рис. 6,



**Рис. 5.** Результаты испытания трудногорючей фанеры в лабораториях: *a* — № 1; *b* — № 2; *c* — № 3; *d* — № 4; *e* — № 6  
**Fig. 5.** Results of testing of flame-retardant plywood in laboratories: *a* — No. 1; *b* — No. 2; *c* — No. 3; *d* — No. 4; *e* — No. 6



**Рис. 6.** Результаты испытания трудногорючей фанеры в лаборатории № 6: *a* — серия № 1; *b* — серия № 2; *c* — серия № 3; 1–4 — номера образцов в рамках серии  
**Fig. 6.** Test results of flame-retardant plywood in Laboratory No. 6: *a* — series No. 1; *b* — series No. 2; *c* — series No. 3; 1–4 — specimen numbers within the series



**Рис. 7.** Зависимость глубины обугливания фанеры от интенсивности падающего теплового потока  
**Fig. 7.** Dependence of the depth of charring of plywood on the intensity of the incident heat flow

демонстрирует значительную изменчивость картины термического воздействия на поверхности образца. Сравнение образцов *a-4* и *c-2* указывает на наличие однотипного раздвоения пламени, что может свидетельствовать об одинаковом их расположении в держателе во время испытания. Тем не менее фронт высокотемпературного воздействия на образец *c-2* оказался значительно выше (приблизительно на 10 см), чем на образце *a-4*. Образец *b-2*, напротив, демонстрирует значительно меньшую степень воздействия пламени по сравнению с другими образцами из этой и других серий. На образцах *b-3* и *c-3* отмечаются выраженные признаки одностороннего сдувания пламени.

Низкая воспроизводимость результатов, наблюдаемая как между разными лабораториями, так и внутри одной лаборатории, подчеркивает сложность стандартизации процесса испытаний по Методу II ГОСТ<sup>3</sup>. Различия носят системный характер, который связан, как было указано в труде [30], с особенностями работы применяемого испытательного оборудования.

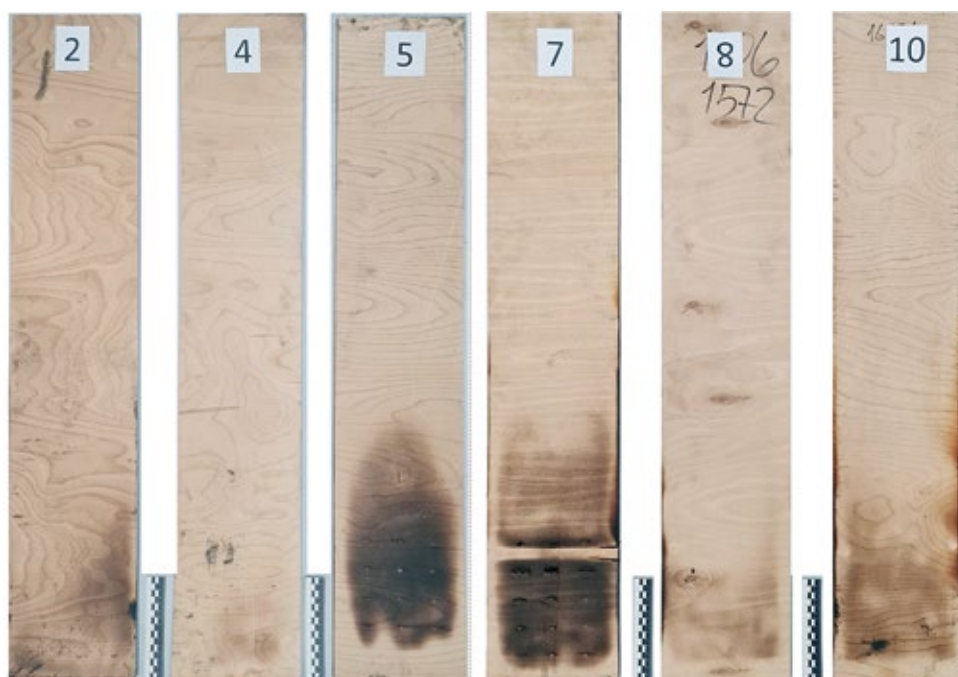
Исследование величины внутренних повреждений образцов также может наглядно характеризовать особенности работы каждой конкретной испытательной печи с точки зрения формируемых тепловых полей. Для более точного определения влияния различных тепловых воздействий на образцы трудногорючей фанеры в рамках исследования, помимо испытаний в шахтной печи, были проведены дополнительные эксперименты на установке ВСМ (соответствующей ГОСТ<sup>4</sup>). Цель заключалась в калибровке результатов, полученных в разных лабораториях, путем стандартизации теплового потока. Образцы фанеры толщиной 10 мм подвергались воздействию стандартизированных тепловых потоков мощностью 5, 10, 15 и 20 кВт/м<sup>2</sup> в течение 10 мин. Это позволило установить зависимость между интенсивностью теплового потока и степенью повреждения материала, а также сравнить эти резуль-

таты с данными, полученными в шахтной печи, где параметры теплового воздействия оказались менее контролируемыми. Анализ результатов показал, что скорость обугливания древесины фанеры демонстрирует практически линейную зависимость от интенсивности теплового потока (рис. 7). При тепловом потоке выше 15 кВт/м<sup>2</sup> наблюдались признаки сквозного прогорания образцов, а при потоке более 20 кВт/м<sup>2</sup> — сплошное сквозное обугливание.

Разница в интенсивности тепловых потоков, генерируемых различными испытательными установками, может быть определена как прямыми измерениями глубины обугливания, так и визуальным осмотром. Визуальный осмотр обратной стороны образцов (рис. 8) выявил существенные различия в характере повреждений. Неоднородность нагрева и обугливания указывает на несоответствие условий испытаний в различных лабораториях, несмотря на использование, казалось бы, одинаковой методики.

Например, в лабораториях № 2, 4 и 8 наблюдались признаки локального прогрева на обратной стороне образцов, что свидетельствует о неравномерном распределении теплового потока в этих установках. При этом на лицевой стороне образца в лаборатории № 2 наблюдался один из самых высоких уровней повреждения (табл. 2, рис. 5). Повреждения на тыльной стороне были ограничены относительно небольшой площадью, и глубина поражения в зоне прямого воздействия не превышала 7–8 мм при общей толщине образцов 10 мм. Лаборатории № 5, 7 и 10 продемонстрировали совершенно другие результаты: сквозное прогорание образцов на значительной площади. В лабораториях № 7 и 10 помимо сквозного прогорания наблюдались следы обтекания образцов пламенем. Признаки обугливания по краям подтверждают данный факт.

Особого внимания заслуживает влияние типа держателя образца, наиболее ярко проявившееся



**Рис. 8.** Тыльная сторона образцов после испытания в разных лабораториях (номера лабораторий представлены номерками на образцах)

**Fig. 8.** The back of the specimens after testing in different laboratories (laboratory numbers are represented by the numbers on the specimens)

в результатах лаборатории № 7. На высоте 17–18 см от нижнего края образца отчетливо видна граница зоны, не подвергшейся сквозному обугливанню. Эта зона совпадает с местом контакта образца с прижимной планкой держателя. Планка обеспечила эффективный отвод тепла, предотвратив глубокое прогорание в этом участке. Аналогичный, хотя и менее выраженный эффект наблюдался в лаборатории № 10, где использовались печь и держатели аналогичной конструкции. Однако существенные различия в конечном результате указывают на то, что режимы испытаний в этих лабораториях существенно отличались. Разброс результатов измерений повреждений по длине и массе образцов объясняется различиями в характере повреждений: от поверхностных в одних лабораториях до сквозных в других. Это подтверждают выводы ранее проведенных исследований [30], указывающих на низкую стандартизацию требований к системам испытаний, используемым в различных лабораториях. В частности, отмечалось, что работа установки «шахтная печь» характеризуется низкой стандартизацией требований к системам подачи воздуха, а также к системам сжигания газового топлива, что в совокупности ведет к формированию неоднородных воздушных потоков и тепловых полей воздействия на образцы. В практике это как раз приводит к тем результатам, что описаны выше, а именно к низкой однородности тепловых условий воздействия на образцы и, соответственно, к высокому разбросу результатов измерений темпе-

ратур дымовых газов в процессе испытаний, а также к широкой дифференциации формируемых в результате испытаний повреждений образца по поверхности и в объеме (массе).

### Обсуждение

При проведении испытаний одного и того же материала в различных лабораториях результаты могут значительно различаться. Это явление, как показано выше, является довольно распространенным и может быть связано с рядом контролируемых параметров, которые, в свою очередь, могут варьироваться в два и более раза между разными лабораториями. Например, в табл. 2 представлены результаты, которые показывают, что длина повреждений, фиксируемая в разных лабораториях, может различаться в среднем от 22 до 53 %, что составляет разницу в 2,4 раза. Аналогичны различия в потере массы, где значения колеблются от 6 до 18 %, что также указывает на трехкратное расхождение. Согласно табл. 3, средние значения температур дымовых газов, полученных в ходе испытаний, варьируются в диапазоне от 89 до 119 °С, что также указывает на заметную разницу в 1,3 раза. Абсолютные температуры могут колебаться от 81 до 120 °С. Примечательно, что минимальные зафиксированные температуры даже оказались ниже минимальных калибровочных значений установки, которые указаны в табл. 5.

**Таблица 5.** Температурные критерии работы шахтной печи при калибровке по ГОСТ 30244<sup>3</sup>**Table 5.** Temperature criteria of the shaft furnace operation during calibration according to GOST 30244<sup>3</sup>

| Расстояние от нижней кромки калибровочного образца, мм<br>Distance from the bottom edges of the calibration specimen, mm | Температура, °С<br>Temperature, °C |                        |
|--|------------------------------------|------------------------|
|  | Максимальная<br>Maximum            | Минимальная<br>Minimum |
| 300  | 350                                | 220                    |
| 500  | 220                                | 150                    |
| 1000   | 140                                | 100                    |
| 1600*  | 105                                | 90                     |

\* Точка фиксации температуры дымовых газов.

\* Flue gas temperature fixation point.

Однако этот факт не следует расценивать как доказательство несоответствия применяемой лабораторией установки требованиям стандарта или калибровки. Причины снижения температуры могут быть многообразными и включают различия в теплофизических характеристиках и отражающих способностях как испытуемого образца, так и калибровочного. Кроме того, следует учитывать особенности поведения антипирированной древесины [31].

Важно отметить, что внимательное изучение критериев калибровки испытательной печи позволяет с высокой степенью уверенности выявить причины, по которым наблюдается значительный разброс результатов по повреждению образцов по длине. Одним из ключевых аспектов, который стоит рассмотреть, является процесс обугливания древесины. Этот процесс интенсивно протекает в диапазоне температур от 250 до 300 °С, что соответствует минимальному калибровочному значению температур для отметки 300 мм от нижней кромки калибровочного образца и верхнему значению температуры для отметки 500 мм. Анализ границ повреждений на образцах, подвергшихся испытанию на определение группы горючести, позволяет однозначно определить температурные интервалы калибровки испытательной установки. Это особенно актуально при работе с антипирированной древесиной, для которой характерно существенное снижение температуры обугливания по сравнению с необработанной древе-

**Рис. 9.** Внешний вид повреждений образца *b-4***Fig. 9.** The appearance of damage to specimen *b-4*

синой [31]. Этот феномен лежит в основе огнезащитного действия большинства пропиточных составов.

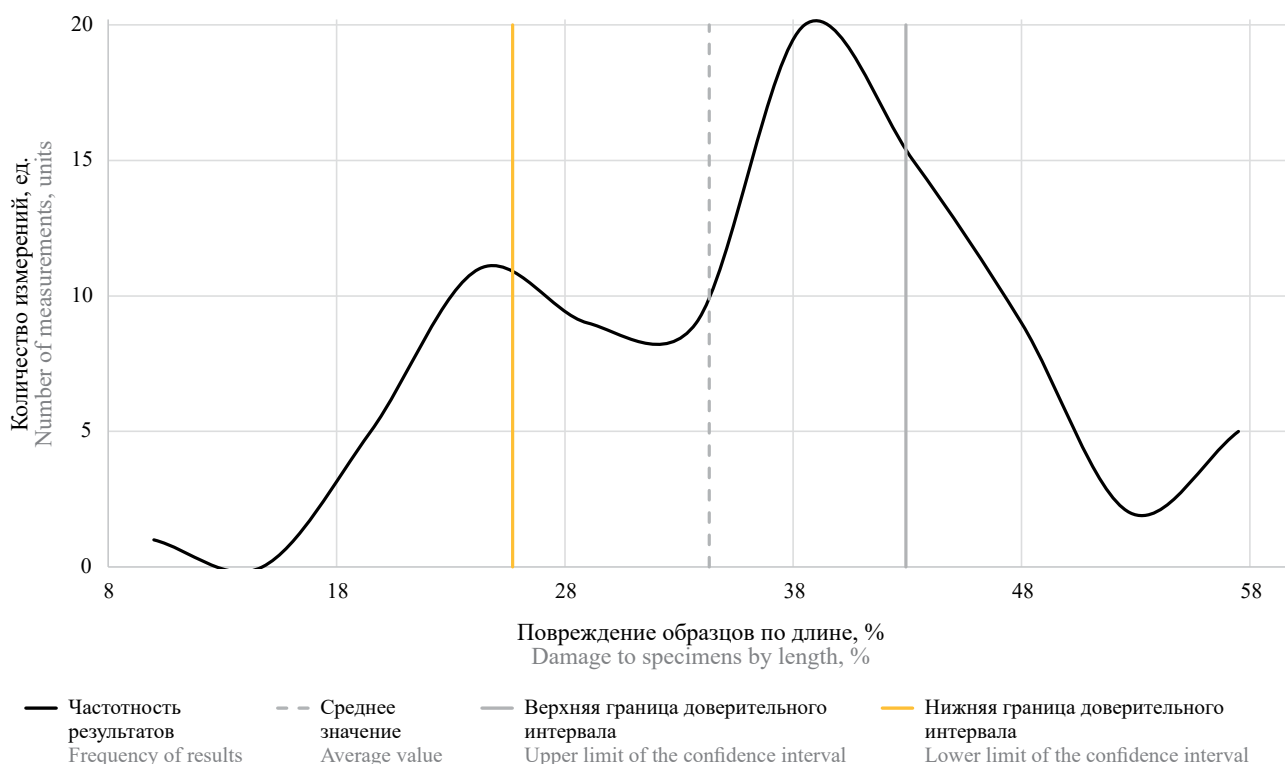
Первичная деструкция древесины, проявляющаяся в ее потемнении, начинается в температурном диапазоне от 120 до 190 °С. Эта температура может попадать в диапазон калибровочных температур на высоте 1000 мм в испытательной камере, что может быть интерпретировано как «повреждение» и объяснять смещение границы фиксируемых повреждений. Наличие выраженного градиента повреждений на образцах, например *b-1* и *b-4* (рис. 6, 9), подтверждает этот эффект.

Учитывая указанные температурные интервалы, можно предположить, что для корбонизирующихся материалов, сходных по термостойкости с антипирированной древесиной, длина повреждений должна находиться в диапазоне от 300 до 500 мм (30 и 50 % от общей длины образца соответственно). Эти диапазоны хорошо согласуются со статистической обработкой данных (рис. 10), где средняя длина повреждений составляет около 350 мм (35 %), а допустимая погрешность измерений — 90 мм (25 %). Результаты, выходящие за эти пределы, могут быть объяснены общей теорией возникновения ошибок измерений, включая неоднозначность критериев интерпретации характера повреждений.

Это означает, что, в общем случае, (нормальные) результаты испытаний в двух разных лабораториях могут находиться в диапазоне от 260 до 440 мм, отличаясь более чем на 50 %, что не может считаться допустимым с точки зрения метрологии.

Для горючих материалов, в том числе антипирированных, такой разброс может быть критичным, поскольку указанному диапазону температур соответствуют энергии активации большинства органических веществ и соединений. В результате в разных лабораториях один и тот же материал может проявлять разные свойства: в одной лаборатории он может быть классифицирован как материал группы Г1, в другой — как Г2.

Разработчики и производители материалов часто оказываются в сложной ситуации, находясь между двумя крайностями. С одной стороны, материалы, не содержащие антипиренов, обладают более высокой энергией активации, что делает их более термически стойкими [32]. Однако, несмотря на это, продукты разложения таких материалов могут иметь высокую способность к самостоятельному горению. Это означает, что даже при низких температурах и в условиях, когда испытательная установка работает на нижней границе калибровки, горение может распространяться по поверхности образца. С другой стороны, введение антипиренов в состав древесины, древесных композитов и других полимерных материалов, как уже упоминалось, часто приводит



**Рис. 10.** Распределение частотности результатов измерений повреждений образцов по длине

**Fig. 10.** Distribution of the frequency of measurement results of damage to specimens by length

к снижению энергии активации, т.е. термической стойкости. Тем не менее это также способствует увеличению выхода негорючих и ингибирующих горение газов [31, 32]. Это может, потенциально, вести к существенному снижению фиксируемых температур дымовых газов, особенно когда испытательная установка работает вблизи минимальных калибровочных значений

Испытания материалов при настройках установки, близких к верхней границе допустимых значений калибровки, могут привести к критическим повреждениям образца. Повышенное содержание некоторых антипиренов может приводить к снижению прочности, ухудшению гибкости, изменению цвета или появлению хрупкости. Более того, продукты термического разложения многих антипиренов обладают токсичностью, что требует тщательного анализа и подбора безопасных композиций [33]. Подбор же оптимальных концентраций огнезащитных соединений в составе материала оказывается затруднительным [34], если не невозможным, в силу низкой метрологической воспроизводимости измерений, осуществляемых с использованием Метода П по ГОСТ<sup>3</sup>.

### Выводы

Существующая методика определения группы горючести несовершенна. Предлагаемые изменения в ГОСТ<sup>3</sup>, такие как стандартизация типа используе-

мого газа, конструкции держателей образцов, улучшение системы подачи воздуха для предотвращения хаотичных потоков в шахтной печи и введение строгих правил калибровки, включая калибровку по калибровочному стальному листу, могут улучшить точность измерений.

Однако эти меры не решают главной проблемы: отсутствие ясной взаимосвязи между физико-химическими процессами горения, контролируемые параметрами и параметрами, которые могли бы использоваться в прогнозировании поведения материалов при пожаре (параметрическом нормировании). В частности, показатель «повреждения» материала сам по себе не информативен. Необходимо одновременно оценивать тепловыделение, скорость распространения пламени, параметры плотности образующегося дыма и другие параметры, объективно характеризующие степень участия материала в развитии пожароопасных процессов.

Современные показатели горючести материалов и классы пожарной опасности строительных конструкций, используемые в нормативной базе в существующем виде, не отражают фактической опасности или, правильнее говорить, особенностей поведения материалов в процессе пожаров и не могут использоваться для целей противопожарного нормирования или целей прогнозирования особенностей развития пожара.

Одним из первоочередных шагов по преодолению существующих проблем может стать разработка единого классификационного стандарта, основанного на комплексной оценке этих параметров, в том числе с применением альтернативных современных мето-

дов аналитического исследования веществ и материалов, прошедших многолетнюю проверку. Результатом, в итоге, должно стать повышение точности прогнозирования развития пожаров и разработка более эффективных мер противопожарной защиты.

### СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. *Gu X., Ling Y.* Research progress of aerogel materials in the field of construction // Alexandria Engineering Journal. 2024. No. 91. Pp. 620–631. DOI: 10.1016/J.AEJ.2024.02.039
2. *Васильева И.Л., Немова Д.В.* Перспективы применения аэрогелей в строительстве // AlfaBuild. 2018. № 4 (6). С. 135–145. DOI: 10.34910/ALF.6.12. EDN LLVFPF.
3. *Baetens R., Jelle B.P., Gustavsen A.* Aerogel insulation for building applications : a state-of-the-art review // Energy and Buildings. 2011. No. 4 (43). Pp. 761–769. DOI: 10.1016/j.enbuild.2010.12.012
4. *Jin R.* Research and application of graphene in construction // IET Conference Proceedings. 2024. No. 19. Pp. 638–641. DOI: 10.1049/ICP.2024.4057
5. *Хворова Н.М.* Строительные материалы будущего: графен // Международный научно-исследовательский журнал. 2016. № 43 (1–2). С. 124–125. DOI: 10.18454/IRJ.2016.43.052. EDN VJUMOX.
6. *Deng S., Fan J., Yi B., Ye J., Li G.* Effect of industrial multi-walled carbon nanotubes on the mechanical properties and microstructure of ultra-high performance concrete // Cement and Concrete Composites. 2025. No. 156. P. 105850. DOI: 10.1016/J.CEMCONCOMP.2024.105850
7. *Motta E.F.B., de Carvalho A.R., Barra J.G.D., Maciel I.O., de Oliveira T.M.* Thermomechanical behavior of concretes with addition of non-functionalized and functionalized carbon nanotubes // Journal of Building Engineering. 2024. No. 96. P. 110642. DOI: 10.1016/J.JOBE.2024.110642
8. *Lesovik V., Fediuk R., Amran M., Vatin N., Timokhin R.* Self-healing construction materials: The geomimetic approach // Sustainability. 2021. No. 16 (13). P. 9033. DOI: 10.3390/SU13169033
9. *Vafaeva K.M., Vatin N.I., Kordas G.* Self-healing building materials: The future of construction // AlfaBuild. 2023. No. 4 (29). Pp. 2912–2912. DOI: 10.57728/ALF.29.12
10. *Kotov E.V., Nemova D., Sergeev V., Dontsova A., Koriakovtseva T., Andreeva D.* Thermal Performance Assessment of Aerogel Application in Additive Construction of Energy-Efficient Buildings // Sustainability. 2024. No. 16 (6). P. 2398. DOI: 10.3390/SU16062398
11. *Chen Z., Zhang W., Huang R., Dong Z., Chen C., Jiang L. et al.* 3D model-based terrestrial laser scanning (TLS) observation network planning for large-scale building facades // Automation in Construction. 2022. No. 144. P. 104594. DOI: 10.1016/J.AUTCON.2022.104594
12. *Kim M., Kim H.* Optimal Pre-processing of Laser Scanning Data for Indoor Scene Analysis and 3D Reconstruction of Building Models // KSCE Journal of Civil Engineering. 2024. No. 1 (28). Pp. 1–14. DOI: 10.1007/S12205-023-2406-9
13. *Kotlyarskaya I.L., Vatin N.I., Nemova D.V.* Thermal Characteristics of a Modular Additive Enclosing Structure // Lecture Notes in Civil Engineering. 2024. No. 335. Pp. 33–42. DOI: 10.1007/978-3-031-30570-2\_4
14. *Kotlyarskaya I., Iakovlev N., Vatin N., Nemova D.* Modular energy-efficient enclosing structures with the aerogel thermal insulation : a review // AlfaBuild. 2022. No. 4 (24). P. 2402. DOI: 10.57728/ALF.24.2. EDN OPZZNR.
15. *Musarat M.A., Alaloul W.S., Rostam N.A.Q.A., Khan A.M.* Substitution of workforce with robotics in the construction industry: A wise or witless approach // Journal of Open Innovation: Technology, Market, and Complexity. 2024. No. 4 (10). P. 100420. DOI: 10.1016/J.JOITMC.2024.100420
16. *You K., Zhou C., Ding L., Wang Y.* Construction Robotics in Extreme Environments: From Earth to Space // Engineering. 2025. DOI: 10.1016/J.ENG.2024.11.037
17. *Zhao C., Chen J.-Y., Sun T., Fan W., Sun X.-Y., Shao Y. et al.* Robotic motion planning for autonomous in-situ construction of building structures // Automation in Construction. 2025. No. 171. P. 105993. DOI: 10.1016/J.AUTCON.2025.105993
18. *Прядко И.П.* Тенденции современной зеленой архитектуры: мировой и российский опыт // Экономика и предпринимательство. 2023. № 11 (160). С. 1016–1024. DOI: 10.34925/EIP.2023.160.11.193. EDN MMJMUZ.
19. *Priyanshu P., Anugya S.* Embracing Sustainable Living : Modern Trend in Architecture // IJFMR — International Journal For Multidisciplinary Research. 2024. No. 2 (6). Pp. 1–6. DOI: 10.36948/IJFMR.2024.V06I02.16403
20. *Kostina E.K., Dudchenko M.Y., Myronenko O.V.* Modern trends in architecture. Green architecture as a form of efficient architecture energy // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. 2019. No. 3 (698). P. 033048. DOI: 10.1088/1757-899X/698/3/033048. EDN PZSJHV.
21. *Patkó C., Adamik P., Pásztor Z.* The Effect of Wooden Building Materials on the Indoor Air Quality of Houses // E3S Web of Conferences. 2024. No. 514. DOI: 10.1051/E3SCONF/202451404003

22. Eom Y.G. Wood and engineering wood as environment — friendly building materials // *Air Cleaning Technology*. 2007. No. 2 (20). Pp. 26–49.
23. Бирюков В.Г., Мишков С.Н., Соболев А.В. Огнезащищенные клееные материалы на основе древесины // *Пожары и чрезвычайные ситуации: предотвращение, ликвидация*. 2014. № 3. С. 28–31. EDN SXJPLN.
24. Бирюков В.Г., Мишков С.Н., Соболев А.В. Исследование огнезащитных свойств трудногорючей фанеры, применяемой в конструкции пассажирского вагона // *Вестник Научно-исследовательского института железнодорожного транспорта*. 2010. № 1 (1). С. 37–40. EDN LHQAQJ.
25. Трушкин Д.В. Проблемы классификации строительных материалов по пожарной опасности. Ч. 2. Сравнительный анализ экспериментальных методов по оценке пожарной опасности строительных материалов, принятых в России и странах Евросоюза. Определение горючести строительных материалов // *Пожаровзрывобезопасность/Fire and Explosion Safety*. 2014. № 4 (23). С. 24–32. EDN SCXYRZ.
26. Гравит М.В., Недрышкин О.В., Вайтццкий А.А., Шпакова А.М., Нугматуллина Д.Г. Пожарно-технические характеристики строительных материалов в Европейских и Российских нормативных документах. Проблемы гармонизации методов исследования и классификации // *Пожаровзрывобезопасность/Fire and Explosion Safety*. 2016. № 10 (25). С. 16–29. DOI: 10.18322/PVB.2016.25.10.16-29. EDN XCNSNZ.
27. Хасанов И.Р., Гравит М.В., Косачев А.А., Пехотиков А.В., Павлов В.В. Гармонизация европейских и российских нормативных документов, устанавливающих общие требования к методам испытаний на огнестойкость строительных конструкций и применению температурных режимов, учитывающих реальные условия пожара // *Пожаровзрывобезопасность/Fire and Explosion Safety*. 2014. № 3 (23). С. 49–57. EDN SFOCFF.
28. Zhang Z., Zhou A., Shi Z., Zhang H., He X., Wang Y. et al. Explaining relationships between chemical structure and tar-rich coal pyrolysis products yield based on Pearson correlation coefficient // *Fuel*. 2025. No. 395. P. 135029. DOI: 10.1016/J.FUEL.2025.135029
29. García-Bertrand R., Baringo L., García-Cerezo Á. Introduction to probability theory // *Encyclopedia of Electrical and Electronic Power Engineering*, 2023. No. 1 (1-3). Pp. 734–746. DOI: 10.1016/B978-0-12-821204-2.00016-7
30. Шмаков А.Г., Коробейничев О.П., Чернов А.А., Полищук Е.Ю., Хохолко В.С., Кирилюк А.В. и др. Совершенствование метрологического обеспечения системы подтверждения соответствия при определении показателя горючести строительных материалов // *Современные пожаробезопасные материалы и технологии : сб. мат. IV Междунар. науч.-практ. конф., посвящ. 30-й годовщине МЧС России*. 2020. С. 128–130. EDN DZTBXP.
31. Балакин В.М., Полищук Е.Ю. Азот-фосфорсодержащие антипирены для древесины и древесных композиционных материалов : литературный обзор // *Пожаровзрывобезопасность/Fire and Explosion Safety*. 2008. № 2 (17). С. 43–51. URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/azot-fosforsoderzhaschie-antipireny-dlya-drevesiny-i-drevesnyh-kompozitsionnyh-materialov-literaturnyy-obzor/viewer>
32. Jiang J., Li J., Hu J., Fan D. Effect of nitrogen phosphorus flame retardants on thermal degradation of wood // *Construction and Building Materials*. 2010. No. 12 (24). Pp. 2633–2637. DOI: 10.1016/J.CONBUILDMAT.2010.04.064
33. Peck G. The Decomposition of Polyurethane and Fire Retardants : a Review. 2023. DOI: 10.20944/PREPRINTS202311.1646.V1
34. Трушкин Д.В., Корольченко О.Н., Бельцова Т.Г. Горючесть древесины, обработанной огнезащитными составами // *Пожаровзрывобезопасность/Fire and Explosion Safety*. 2008. № 1 (17). С. 29–33. URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/goryuchest-drevesiny-obrabotannoy-ognezashchitnymi-sostavami/viewer>

## REFERENCES

1. Gu X., Ling Y. Research progress of aerogel materials in the field of construction. *Alexandria Engineering Journal*. 2024; 91:620-631. DOI: 10.1016/J.AEJ.2024.02.039
2. Vasileva I.L., Nemova D.V. Prospects of using aerogels in construction. *AlfaBuild*. 2018; 4(6):135-145. DOI: 10.34910/ALF.6.12
3. Baetens R., Jelle B.P., Gustavsen A. Aerogel insulation for building applications : a state-of-the-art review. *Energy and Buildings*. 2011; 4(43):761-769. DOI: 10.1016/j.enbuild.2010.12.012
4. Jin R. Research and application of graphene in construction. *IET Conference Proceedings*. 2024; 19:638-641. DOI: 10.1049/ICP.2024.4057
5. Khvorova N.M. Building materials of the future: graphene. *Mezhdunarodnyj nauchno-issledovatel'skij zhurnal/International Research Journal*. 2016; 1(43). DOI: 10.18454/IRJ.2016.43.052. EDN VJUMOX. (rus).
6. Deng S., Fan J., Yi B., Ye J., Li G. Effect of industrial multi-walled carbon nanotubes on the mechanical properties and microstructure of ultra-high performance concrete. *Cement and Concrete Composites*. 2025; 156:105850. DOI: 10.1016/J.CEMCONCOMP.2024.105850

7. Motta E.F.B., de Carvalho A.R., Barra J.G.D., Maciel I.O., de Oliveira T.M. Thermomechanical behavior of concretes with addition of non-functionalized and functionalized carbon nanotubes. *Journal of Building Engineering*. 2024; 96:110642. DOI: 10.1016/J.JOBE.2024.110642
8. Lesovik V., Fediuk R., Amran M., Vatin N., Timokhin R. Self-healing construction materials: The geomimetic approach. *Sustainability*. 2021; 16(13):9033. DOI: 10.3390/SU13169033
9. Vafaeva Kh.M., Vatin N.I., Kordas G. Self-healing building materials: The future of construction. *AlfaBuild*. 2023; 4(29):2912-2912. DOI: 10.57728/ALF.29.12
10. Kotov E.V., Nemova D., Sergeev V., Dontsova A., Koriakovtseva T., Andreeva D. Thermal Performance Assessment of Aerogel Application in Additive Construction of Energy-Efficient Buildings. *Sustainability*. 2024; 16(6):2398. DOI: 10.3390/SU16062398
11. Chen Z., Zhang W., Huang R., Dong Z., Chen C., Jiang L. et al. 3D model-based terrestrial laser scanning (TLS) observation network planning for large-scale building facades. *Automation in Construction*. 2022; 144:104594. DOI: 10.1016/J.AUTCON.2022.104594
12. Kim M., Kim H. Optimal Pre-processing of Laser Scanning Data for Indoor Scene Analysis and 3D Reconstruction of Building Models. *KSCE Journal of Civil Engineering*. 2024; 1(28):1-14. DOI: 10.1007/S12205-023-2406-9
13. Kotlyarskaya I.L., Vatin N.I., Nemova D.V. Thermal Characteristics of a Modular Additive Enclosing Structure. *Lecture Notes in Civil Engineering*. 2024; 335:33-42. DOI: 10.1007/978-3-031-30570-2\_4
14. Kotlyarskaya I., Iakovlev N., Vatin N., Nemova D. Modular energy-efficient enclosing structures with the aerogel thermal insulation : a review. *AlfaBuild*. 2022; 4(24):2402. DOI: 10.57728/ALF.24.2
15. Musarat M.A., Alaloul W.S., Rostam N.A.Q.A., Khan A.M. Substitution of workforce with robotics in the construction industry: A wise or witless approach. *Journal of Open Innovation: Technology, Market, and Complexity*. 2024; 4(10):100420. DOI: 10.1016/J.JOITMC.2024.100420
16. You K., Zhou C., Ding L., Wang Y. Construction Robotics in Extreme Environments: From Earth to Space. *Engineering*. 2025. DOI: 10.1016/J.ENG.2024.11.037
17. Zhao C., Chen J.Y., Sun T., Fan W., Sun X.Y., Shao Y. et al. Robotic motion planning for autonomous in-situ construction of building structures. *Automation in Construction*. 2025; 171:105993. DOI: 10.1016/J.AUTCON.2025.105993
18. Pryadko I.P. Trends in modern green architecture: global and Russian experience. *Economics and entrepreneurship*. 2023; 11(160):1016-1024. DOI: 10.34925/EIP.2023.160.11.193. EDN MMJMUZ. (rus).
19. Priyanshu P., Anugya S. Embracing Sustainable Living : Modern Trend in Architecture. *IJFMR — International Journal For Multidisciplinary Research*. 2024; 2(6):1-6. DOI: 10.36948/IJFMR.2024.V06I02.16403
20. Kostina E.K., Dudchenko M.Y., Myronenko O.V. Modern trends in architecture. Green architecture as a form of efficient architecture energy. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*. 2019; 3(698):033048. DOI: 10.1088/1757-899X/698/3/033048. EDN PZSJHV.
21. Patkó C., Adamik P., Pásztor Z. The Effect of Wooden Building Materials on the Indoor Air Quality of Houses. *E3S Web of Conferences*. 2024; 514. DOI: 10.1051/E3SCONF/202451404003
22. Eom Y.G. Wood and engineering wood as environment — friendly building materials. *Air Cleaning Technology*. 2007; 2(20):26-49.
23. Biryukov V.G., Mishkov S.N., Sobolev A.V. Fire-proof adhesive-bonded wood-based materials. *Fires and emergencies: prevention, elimination*. 2014; 3:28-30. EDN SXJPLN. (rus).
24. Biryukov V.G., Mishkov S.N., Sobolev A.V. Study of fire-protecting properties of hardly-combustible plywood used in structures of passenger cars. *VNIIZHT bulletin (railway research institute bulletin)*. 2010; 1(1):37-40. EDN LHQAQJ. (rus).
25. Trushkin D.V. Problems of classification of construction materials on fire hazard. Part 2. Comparative analysis of experimental methods for fire hazard assessment of construction materials accepted in Russia and the European Union countries. Determination of combustibility for construction materials. *Pozharovzryvobezopasnost/Fire and Explosion Safety*. 2014; 4(23):24-32. EDN SCXYRZ. (rus).
26. Gravit M.V., Nedryshkin O.V., Vaytitskiy A.A., Shpakova A.M., Nigmatullina D.G. Fire technical characteristics of building materials in the European and Russian regulatory documents. Problems of harmonization of research methods and classification. *Pozharovzryvobezopasnost/Fire and Explosion Safety*. 2016; 10(25):16-29. DOI: 10.18322/PVB.2016.25.10.16-29. EDN XCNSNZ. (rus).
27. Khasanov I.R., Gravit M.V., Kosachev A.A., Pekhotikov A.V., Pavlov V.V. Harmonization of European and Russian regulatory documents establishing general requirements for fire resistance testing methods for building structures and the use of temperature curves that take into account real fire conditions. *Pozharovzryvobezopasnost/Fire and Explosion Safety*. 2014; 3(23):49-57. EDN SFOCFF. (rus).
28. Zhang Z., Zhou A., Shi Z., Zhang H., He X., Wang Y. et al. Explaining relationships between chemical structure and tar-rich coal pyrolysis products yield based on Pearson correlation coefficient. *Fuel*. 2025; 395:135029. DOI: 10.1016/J.FUEL.2025.135029

29. García-Bertrand R., Baringo L., García-Cerezo Á. Introduction to probability theory. *Encyclopedia of Electrical and Electronic Power Engineering*. 2023; 1(1-3):734-746. DOI: 10.1016/B978-0-12-821204-2.00016-7
30. Shmakov A.G., Korobeynichev O.P., Chernov A.A., Polishchuk E.Yu., Hoholko V.S., Kirilyuk A.V. et al. Improvement the metrological support of the conformity assessment system for determining the combustibility index of building materials. *Modern fireproof 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*. 2020; 128-130. EDN DZTBXP. (rus).
31. Balakin V.M., Polishchuk E.Y. Nitrogen-phosphorus flame retardants for wood and wood composite materials : literature review. *Pozharovzryvobezopasnost/Fire and Explosion Safety*. 2008; 2(17):43-51. URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/azot-fosforsoderzhaschie-antipireny-dlya-drevesiny-i-drevesnyh-kompozitsionnyh-materialov-literaturnyy-obzor/viewer> (rus).
32. Jiang J., Li J., Hu J., Fan D. Effect of nitrogen phosphorus flame retardants on thermal degradation of wood. *Construction and Building Materials*. 2010; 12(24):2633-2637. DOI: 10.1016/J.CONBUILDMAT.2010.04.064
33. Peck G. The Decomposition of Polyurethane and Fire Retardants : a Review. *Preprints*. 2023. DOI: 10.20944/PREPRINTS202311.1646.V1
34. Trushkin D.V., Korolchenko O.N., Beltsova T.G. Flammability of wood treated with flame retardants. *Pozharovzryvobezopasnost/Fire and Explosion Safety*. 2008; 1(17):29-33. URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/goryuchest-drevesiny-obrabotannoy-ognezaschitnymi-sostavami/viewer> (rus).

Поступила 07.04.2025, после доработки 30.06.2025;

принята к публикации 10.07.2025

Received April 07, 2025; Received in revised form June 30, 2025;

Accepted July 10, 2025

### Информация об авторах

**ПОЛИЩУК Евгений Юрьевич**, к.т.н., руководитель направления «Пожарная безопасность строительных материалов и конструкций», СБЕ ПМИПИР ГК ТехноНИКОЛЬ, Россия, 129110, г. Москва, ул. Гиляровского, 47, стр. 5; ORCID: 0000-0001-9412-823X; ResearcherID: R-6837-2016; e-mail: [polishchuk@tn.ru](mailto:polishchuk@tn.ru)

**КРУГЛОВ Евгений Юрьевич**, к.т.н., 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, Московская обл., г. Балашиха, мкр. ВНИИПО, 12; ORCID: 0000-0003-3684-5083; e-mail: [89268196698@mail.ru](mailto:89268196698@mail.ru)

**КУДРЯШОВ Вадим Александрович**, к.т.н., ведущий научный сотрудник, Научно-исследовательское республиканское унитарное предприятие по строительству «Институт БелНИИС», Республика Беларусь, 220076, г. Минск, ул. Скорины, 15 «Б»; ORCID: 0000-0003-4889-1060; e-mail: [vadkud@gmail.com](mailto:vadkud@gmail.com)

**ШОЯ Владислав Сергеевич**, руководитель лаборатории пожарных испытаний, СБЕ ПМИПИР ГК ТехноНИКОЛЬ, Россия, 390047, г. Рязань, район Восточный Промузел, 21, пом. 6Н; ORCID: 0009-0008-5455-5278; e-mail: [iravassilek@mail.ru](mailto:iravassilek@mail.ru)

**ГРАВИТ Марина Викторовна**, к.т.н., доцент, ведущий научный сотрудник лаборатории механики многокомпонентных и многофазных сред, Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого, Россия, 195251,

### Information about the authors

**Evgeny Yu. POLISHCHUK**, Cand. Sci. (Eng.), Head of the department “Fire Safety of building materials and structures”, SBE PMiPIR TechnoNICOL Group, Gelyarovskogo St., 5, Moscow, 129110, Russian Federation; ORCID: 0000-0001-9412-823X; ResearcherID: R-6837-2016; e-mail: [polishchuk@tn.ru](mailto:polishchuk@tn.ru)

**Evgeny Yu. KRUGLOV**, Cand. Sci. (Eng.), Leading Researcher, All-Russian Research Institute for Fire Protection of Ministry of Russian Federation for Civil Defence, Emergencies and Elimination of Consequences of Natural Disasters, VNIPO, 12, Balashikha, Moscow Region, 143903, Russian Federation; ORCID: 0000-0003-3684-5083; e-mail: [89268196698@mail.ru](mailto:89268196698@mail.ru)

**Vadim A. Kudryashov**, Cand. Sci. (Eng.), Leading Researcher, Research and Development Republican Unitary Enterprise for Construction BelNIIS Institute, Skaryna St., 15 “B”, Minsk, 220076, Republic of Belarus; ORCID: 0000-0003-4889-1060; e-mail: [vadkud@gmail.com](mailto:vadkud@gmail.com)

**Vladislav S. SHOYA**, Head of the Fire Testing Laboratory, SBE PMiPIR TechnoNICOL Group, Vostochniy promuzel distr., 21, room 6H, Ryazan’, 390027, Russian Federation; ORCID: 0009-0008-5455-5278; e-mail: [iravassilek@mail.ru](mailto:iravassilek@mail.ru)

**Marina V. GRAVIT**, Cand. Sci. (Eng.), Associate Professor, Lead scientific co-workers Laboratory of Mechanics of Multicomponent and Multiphase Media, Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University, Politekhnikeskaya St., 29, letter B, St. Petersburg,

г. Санкт-Петербург, вн. тер. г. муниципальный округ Академическое, ул. Политехническая, д. 29, литера Б; ORCID: 0000-0003-1071-427X; ResearcherID: B-4397-2014; AuthorID: 56826013600; e-mail: marina.gravit@mail.ru

**КОТЛЯРСКАЯ Ирина Леонидовна**, младший научный сотрудник лаборатории защищенных и модульных сооружений, Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого, Россия, 195251, г. Санкт-Петербург, вн. тер. г. муниципальный округ Академическое, ул. Политехническая, д. 29, литера Б; ORCID: 0000-0002-8396-4870; ResearcherID: ABE-1858-2021; AuthorID: 57208300172; e-mail: iravassilek@mail.ru

**Вклад авторов:**

**Полищук Е.Ю.** — концепция исследования; научное редактирование текста.

**Круглов Е.Ю.** — сбор материала.

**Кудряшов В.А.** — обработка материала.

**Шоя В.С.** — экспериментальные исследования.

**Гравит М.В.** — научное руководство.

**Котлярская И.Л.** — составление литературного обзора; редактирование текста статьи.

*Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.*

inner territory of the city, Municipal District Akademicheskaya, 195251, Russian Federation; ORCID: 0000-0003-1071-427X; ResearcherID: B-4397-2014; AuthorID: 56826013600; e-mail: marina.gravit@mail.ru

**Irina L. KOTLYARSKAYA**, Jr. scientific co-workers Laboratory of Secure and Modular Structures, Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University, Politekhnicheskaya St., 29, letter B, St. Petersburg, inner territory of the city, Municipal District Akademicheskaya, 195251, Russian Federation; ORCID: 0000-0002-8396-4870; ResearcherID: ABE-1858-2021; AuthorID: 57208300172; e-mail: iravassilek@mail.ru

**Contribution of the authors:**

**Polishchuk E.Yu.** — research concept; scientific text editing.

**Kruglov E.Yu.** — collection of material.

**Kudryashov V.A.** — processing of material.

**Shoya V.S.** — experimental research.

**Gravit M.V.** — scientific guidance.

**Kotlyarskaya I.L.** — compilation of a literary review; editing the text of an article.

*The authors declare no conflicts of interests.*

## Оценка пожаровзрывобезопасного применения анионообменной смолы АВ-17-8 в нитратной форме в сорбционной колонне

Александра Михайловна Кошечева ✉, Кирилл Владимирович Шеламо́в, Антон Владимирович Понизов

Научно-технический центр по ядерной и радиационной безопасности (НТЦ ЯРБ), г. Москва, Россия

### АННОТАЦИЯ

**Введение.** На объектах использования атомной энергии широко применяются ионообменные смолы (ИОС). При эксплуатации смол в азотнокислых средах не исключено их саморазложение при повышенных температурах, что может приводить к аварийным ситуациям. Известно, что анионообменные смолы в нитратной форме разлагаются при температурах выше 220 °С с тепловыделением, превышающим 300 Дж/г, что может представлять потенциальную опасность для технологий извлечения, разделения и очистки радионуклидов.

**Цель и задачи.** Целью данной работы является оценка граничных условий пожаровзрывобезопасного применения анионита АВ-17-8 в сорбционной колонне. Задачи включают исследование термической стабильности анионита методом дифференциально-сканирующей калориметрии, оценку кинетических параметров протекающих реакций окисления, моделирование процесса тепловыделения в сорбционной колонне. С учетом полученных данных проведена оценка граничных условий возникновения теплового взрыва в оборудовании с АВ-17-8.

**Методическая часть.** При изучении термической стабильности образцов нагрев проводили в синхронном термическом анализаторе STA 449 F3 Jupiter. Последующую обработку данных осуществляли с использованием программного комплекса Arks фирмы ЗАО «Химинформ», этапы которой включали первичную обработку (вычитание базовой линии, восстановление данных, определение величин тепловых эффектов) и последующее моделирование тепловыделения в колонне, заполненной сорбентом, с определенными геометрическими и теплофизическими параметрами.

**Результаты и обсуждение.** Методом ДСК установлено, что смола АВ-17-8 в нитратной форме разлагается в две стадии в диапазоне температур 100–200 и 200–320 °С с тепловыделением 148 ± 13 и 425 ± 43 Дж/г соответственно. Для двух экзотермических эффектов оценены кинетические параметры разложения анионита, с помощью которых определены граничные температуры возникновения теплового взрыва в сорбционной колонне в зависимости от ее геометрии.

**Выводы.** Программный комплекс Arks позволяет моделировать условия возникновения теплового взрыва в технологическом оборудовании. С учетом оцененных параметров представляется возможным спрогнозировать развитие неуправляемых экзотермических реакций, которые определяют пожаровзрывобезопасность применения анионообменных смол.

**Ключевые слова:** ионообменная смола; моделирование; кинетические параметры; термическая стабильность; пожаровзрывоопасность

**Для цитирования:** Кошечева А.М., Шеламо́в К.В., Понизов А.В. Оценка пожаровзрывобезопасного применения анионообменной смолы АВ-17-8 в нитратной форме в сорбционной колонне // Пожаровзрывобезопасность/ Fire and Explosion Safety. 2025. Т. 34. № 4. С. 32–41. DOI: 10.22227/0869-7493.2025.34.04.32-41

✉ Кошечева Александра Михайловна, e-mail: koscheeva@secnrs.ru

## Assessment of fire and explosion safe use of the anion exchange resin AV-17-8 in nitrate form in a sorption column

Aleksandra M. Koscheeva ✉, Kirill V. Shelamov, Anton V. Ponizov

Scientific and engineering centre for nuclear and radiation safety (STC NRS), Moscow, Russian Federation

### ABSTRACT

**Introduction.** Ion exchange resins are widely used at nuclear fuel cycle facilities. During the exploitation of resins in nitric acid solutions, its self-decomposition at high temperatures is not excluded, which can lead to accidental

situations. It is known that anion exchange resins in nitrate form decompose with heat release with the value higher than 300 J/g at the temperatures above 220 °C, which may pose a potential danger to technologies of extraction, separation and purification of radionuclides.

**Aims and objectives.** In this study, the problem was set to assess boundary conditions of fire and explosion safe use of AV-17-8 anion exchange resins in a sorption column. The objectives included the following steps: investigation of thermal stability of the anionite by differential scanning calorimetry; assessment of the kinetic parameters of the ongoing oxidation reactions; modeling of the process of the heat release in a sorption column. Based on the data obtained, the assessment of the boundary condition for a thermal explosion occurrence in equipment with AV-17-8 was carried out.

**Methodology.** For the investigation of the samples under study thermal stability, the heating was conducted in synchronous thermal analyzer STA 449 F3 Jupiter. Subsequent data analysis was performed in the Arks specialized software CJSC "Khiminform", the stages of which included primary processing (base line subtraction, deconvolution of the heat flow signal, determination of thermal effects values), and modeling of the heat release in the column filled with sorbent with certain geometric and thermophysical parameters.

**Results and discussion.** It was determined by differential scanning calorimetry that the AV-17-8 resin in nitrate form decomposes in two stages at the temperature ranges of 100–200 and 200–320 °C with the heat release values of  $148 \pm 13$  and  $425 \pm 43$  J/g respectively. For these two exothermic effects, the kinetic parameters of the anionite decomposition, with the use of which the boundary temperatures of a thermal explosion in the sorption column depending on its radius are determined.

**Conclusion.** The Arks software provides an opportunity to simulate conditions for a thermal explosion occurrence in technological equipment. Considering the estimated parameters, it is possible to predict the development of uncontrolled exothermic reactions which determine fire and explosion safety of anion exchange resins application.

**Keywords:** ion exchange resin; modeling; kinetic parameters; thermal stability, fire and explosion hazard

**Для цитирования:** Koscheeva A.M., Shelamov K.V., Ponizov A.V. Assessment of fire and explosion safe use of the anion exchange resin AV-17-8 in nitrate form in a sorption column. *Pozharovzryvobezopasnost/ Fire and Explosion Safety*. 2025; 34(4):32-41. DOI: 10.22227/0869-7493.2025.34.04.32-41 (rus).

✉ Aleksandra Mikhailovna Koscheeva, e-mail: koscheeva@secnrs.ru

## Введение

В связи с активным развитием атомной энергетики в мире [1, 2] и в Российской Федерации [3–5] актуальной проблемой являются накопленные радиоактивные отходы (РАО)<sup>1,2</sup> и обращение с ними [6, 7]. Так, для извлечения целевых компонентов из растворов при обращении с жидкими РАО широко используют ионообменные смолы (ИОС) [8]. При эксплуатации ИОС подвергаются химическим и физическим воздействиям, что приводит к разрушению ковалентных связей [9] и, как следствие, к выработке их ресурса. Необходимо учитывать, что в сорбционном оборудовании анионообменные смолы находятся в нитратной форме и контактируют с азотнокислыми средами, поэтому предположительно способны к саморазложению с выделением тепла вследствие протекания окислительных процессов, что может потенциально приводить к авариям [10, 11] при эксплуатации.

Следует отметить, что для обработавших ИОС [12–14], при переработке такими методами, как цементирование [15], битумирование [9], пиролиз [16] и ряд других [17], в литературных источниках приводятся немногочисленные результаты по оценке пожаровзрывобезопасности [18]. Так, например,

в работе [19] авторами была исследована термическая стабильность высокоосновного анионита АВ-17-8 и его химического аналога Токем 845 методами дифференциально сканирующей калориметрии применительно к захоронению смолы в невозвратном защитном контейнере. Установлено, что аниониты в нитратной форме экзотермически разлагаются в температурном диапазоне 220–330 °C с тепловыделением > 300 Дж/г, что позволяет классифицировать их как вещества, способные к саморазложению, согласно Международному стандарту<sup>3</sup>. Однако для процессов применения смолы АВ-17-8 в сорбционном оборудовании в случаях нарушения нормальной эксплуатации анализ литературных данных не выявил работ по определению показателей ПВБ, а именно температуры начала возникновения теплового взрыва. В связи с чем в данной работе поставлена цель оценить граничные условия пожаровзрывобезопасного обращения со смолой АВ-17-8 при ее эксплуатации в сорбционном оборудовании. Для этого была исследована термическая устойчивость анионита после контакта с азотнокислыми средами методом дифференциально-сканирующей калориметрии (ДСК), оценены кинетические параметры протекающих реакций окисления и граничные условия возникновения теплового взрыва в сорбционной колонне с АВ-17-8.

<sup>1</sup> Об обращении с радиоактивными отходами и о внесении изменений в отдельные законодательные акты Российской Федерации : Федеральный закон от 11.07.2011 № 190-ФЗ.

<sup>2</sup> НП-019-15. Сбор, переработка, хранение и кондиционирование жидких радиоактивных отходов. Требования безопасности.

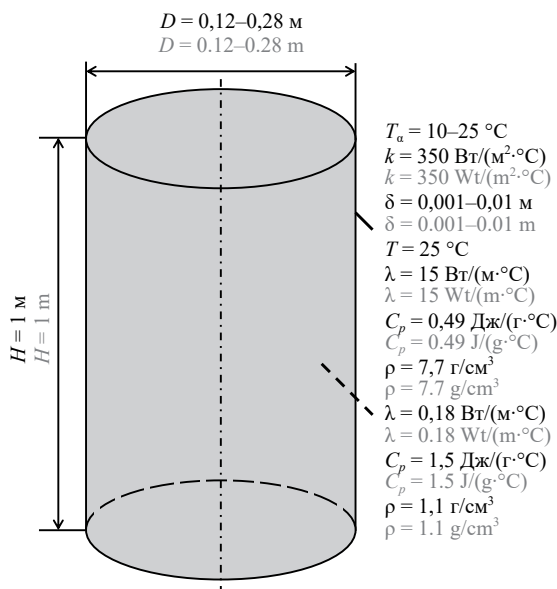
<sup>3</sup> United Nations Economic Commission for Europe, 2019. Recommendations on the Transport of Dangerous Goods. Model Regulations. Vol. I, 21st revised edition, New York and Geneva.

### Методическая часть

Объектом исследования являлась высокоосновная анионообменная смола АВ-17-8 в нитратной форме. Для ее приготовления навеску исходной смолы в хлоридной форме, помещенную в пробирку, заливали 6 моль/л азотной кислотой так, что весь объем смолы был заполнен раствором. Далее выдерживали систему в течение 1 суток, декантировали смолу и высушивали при комнатной температуре до постоянной массы.

Информацию о поведении АВ-17-8 при термическом нагреве получали методом ДСК, анализ проводили с помощью синхронного термического анализатора STA 449 F3 Jupiter. Для этого исследуемые образцы массой 5–15 мг помещали в корундовые тигли и проводили нагрев в инертной атмосфере (70 мл  $N_2$ /мин) до температур 450–600 °С. Скорость нагрева составляла 1, 2 и 5 К/мин.

Первичную обработку кривых ДСК осуществляли с помощью программного обеспечения (ПО) Arks Thermal Analysis (Arks TA) фирмы ЗАО «Химинформ»<sup>4</sup>. Начальным этапом обработки являлись операции вычитания базовой линии пустого тигля, восстановления исходного сигнала и температуры образца [20]. В специализированном ПО Arks Formal Kinetics (Arks FK)<sup>5</sup>, которое реализует методы математической оптимизации, были оценены кинетические параметры разложения анионита АВ-17-8. При проведении анализа для заданной модели подбирали такой набор параметров, который обеспечивает минимальное значение суммы квадратов отклонений между экспериментальными и расчетными величинами. Моделирование граничных условий возникновения теплового взрыва в сорбционной колонне проводили в ПО Arks Thermal Analysis (Arks TE)<sup>6</sup>, реализующем решение системы дифференциальных уравнений в частных производных, включая уравнение теплового баланса и кинетическое уравнение химической реакции. При моделировании рассматривался случай нарушения нормальной эксплуатации, связанный с работой гидродинамического режима оборудования, вследствие чего возможно частичное осушение колонны с загруженным анионом. Тепловыделение нереакционного происхождения при этом может приводить к повышению температуры в колонне и протеканию окислительных процессов. При моделировании задавали геометрию колонны и теплофизические параметры, представленные на рис. 1, исходя из того, что загрузка смолы состав-



**Рис. 1.** Геометрия рабочего объема колонны с АВ-17-8 и теплофизические параметры для расчета условия возникновения теплового взрыва

**Fig. 1.** Geometry of the sorption column and thermophysical parameters for the thermal explosion calculations

ляет 2/3 от общего объема колонны. Рабочие характеристики: диаметр  $D = 0,12-0,28 \text{ м}$ , высота  $H = 1 \text{ м}$ , колонна из нержавеющей стали с толщиной стенки в диапазоне  $\delta = 0,1-1 \text{ см}$ , охлаждаемая водой, циркулирующей в рубашке (принята температура воды  $T_a = 10-25 \text{ }^\circ\text{C}$ ). Задаваемые теплофизические характеристики: коэффициент теплообмена колонны с рубашкой  $k = 350 \text{ Вт/(м}^2\cdot\text{К)}$ , плотность, теплоемкость и теплопроводность стали равна соответственно  $\rho = 7,7 \text{ г/см}^3$ ,  $C_p = 0,49 \text{ Дж/(г}\cdot^\circ\text{C)}$ ,  $\lambda = 15 \text{ Вт/(м}\cdot^\circ\text{C)}$ ; плотность, теплоемкость и теплопроводность смолы АВ-17-8:  $\rho = 1,1 \text{ г/см}^3$ ,  $C_p = 1,5 \text{ Дж/(г}\cdot^\circ\text{C)}$ ,  $\lambda = 0,18 \text{ Вт/(м}\cdot^\circ\text{C)}$  соответственно, начальная температура стенки  $T = 10-25 \text{ }^\circ\text{C}$ . С использованием указанных параметров исследовано влияние геометрии колонны на критическую температуру возникновения теплового взрыва.

Процесс теплового взрыва моделировали посредством решения системы нестационарных дифференциальных уравнений в частных производных, состоящей из уравнения теплового баланса и кинетического уравнения химической реакции. Для цилиндра ограниченной высоты уравнение теплового баланса имеет форму уравнения нестационарной теплопроводности [20]:

$$C_p \rho \frac{\partial T}{\partial t} = \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left( r \lambda(r, z) \frac{\partial T}{\partial r} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left( \lambda(r, z) \frac{\partial T}{\partial z} \right) + \sum_{i=1}^{NC} Q^{\infty(i)} W^{(i)}, \quad (1)$$

где  $C_p$  — теплоемкость системы;

<sup>4</sup> Arks TA Software. URL: <https://www.cisp.spb.ru/arks-ta> (дата обращения: 28.02.2025).

<sup>5</sup> Arks FK Software. URL: <https://www.cisp.spb.ru/arks-fk> (дата обращения: 28.02.2025).

<sup>6</sup> Arks TE Software. URL: <https://www.cisp.spb.ru/arks-te> (дата обращения: 28.02.2025).

$\rho$  — плотность системы;  
 $T$  — температура в системе;  
 $t$  — время с начала моделирования;  
 $r$  — радиус колонны;  
 $z$  — высота колонны;  
 $\lambda$  — теплопроводность системы;  
 $NC$  — количество независимых реакций;  
 $Q^{(i)}$  — тепловой эффект  $i$ -й реакции;  
 $W^{(i)}$  — ее скорость.

Кинетическое уравнение описывается следующим выражением [20]:

$$\frac{d\alpha^{(i)}}{dt} = W^{(i)}, \quad i = 1, \dots, NC, \quad (2)$$

где  $\alpha^{(i)}$  — степень превращения для  $i$ -й реакции.

### Результаты и их обсуждение

Термограммы термической деструкции образцов смолы АВ-17-8 в нитратной форме после длительного контакта с 4 моль/л азотной кислотой представлены на рис. 2. Установлено, что нагрев сопровождается двумя экзотермическими процессами, протекающими в диапазоне температур 100–200 и 200–320 °С с тепловыделением  $148 \pm 13$  и  $425 \pm 43$  Дж/г соответственно. При этом с уменьшением скорости нагрева наблюдается небольшое смещение максимума скорости тепловыделения в область меньших температур, что указывает на возможный автокаталитический характер процесса. Первый наблюдаемый эффект, вероятно, связан с несорбированной азотной кислотой, находя-

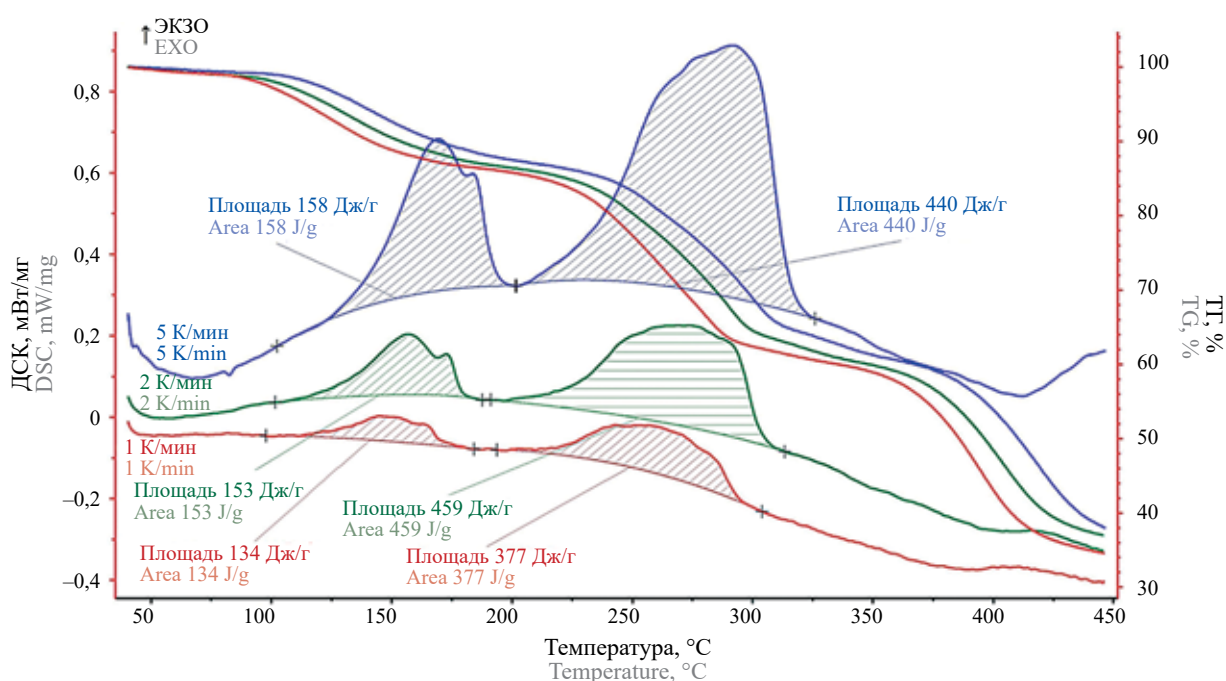
щейся в межпоровом пространстве смолы. Второй эффект совпадает по температурным диапазонам с установленным ранее [19].

В специализированном ПО Arks FK оценены кинетические параметры окисления исследованных образцов. Для этого предложена упрощенная схема реакции вида  $A \rightarrow B \rightarrow C$ , учитывающая экзотермические эффекты, которые соответствуют процессам окисления функциональных групп и матрицы смолы соответственно. Реакции описываются уравнением общего автокатализа, что позволяет учесть смещение тепловых эффектов по температуре при уменьшении скорости нагрева:

$$r_i = k_0 e^{-E/RT} (1 - \alpha_1)^{n_1} (z_0 e^{-E_2/RT} + \alpha_2)^{n_2}. \quad (3)$$

В первом приближении принято допущение, что величина тепловыделения не зависит от скорости нагрева. Методом компьютерной оптимизации оценены параметры кинетического уравнения, которые представлены в таблице. Экспериментальные кривые теплового потока сопоставлены с расчетными (рис. 3), отмечена высокая сходимость результатов.

С помощью полученных кинетических параметров разложения анионита АВ-17-8 в нитратной форме были проведены оценочные расчеты возможности возникновения теплового взрыва в сорбционной колонне, представленные на рис. 4, 5. Рассмотрено влияние начальной температуры в колонне на ее рост с течением времени и изменение кривых превращения реакций  $A \rightarrow B$  и  $B \rightarrow C$ . Расчеты проведены для радиуса колонны



**Рис. 2.** Термограммы смолы АВ-17-8 в нитратной форме в инертной атмосфере при разных скоростях нагрева  
**Fig. 2.** The thermograms of the AV-17-8 anion exchange resin in nitrate form in nitrate atmosphere on the different rates

Кинетические параметры разложения анионита АВ-17-8 в нитратной форме  
The kinetic parameters of the decomposition of the AV-17-8 anion exchange resin in nitrate form

| Параметр<br>Parameter   | Единица<br>измерения<br>Unit | Значение для стадии<br>$A \rightarrow B$<br>Value for<br>the $A \rightarrow B$ stage | Значение для стадии<br>$B \rightarrow C$<br>Value for<br>the $B \rightarrow C$ stage |                      |
|---|------------------------------|--|--|----------------------|
| Предэкспоненциальный множитель<br>Preexponential factor                                   | $k_0$                        | $\text{с}^{-1}$<br>$\text{sec}^{-1}$   | $3,11 \cdot 10^{12}$   | $1,95 \cdot 10^{12}$ |
| Энергия активации<br>Activation energy  | $E$                          | кДж/моль<br>kJ/mol   | 122,3  | 163,0                |
| Порядок реакции<br>Reaction order   | $n_1$                        | —  | 2,00   | 1,70                 |
|   | $n_2$                        |  | 1,70   | 0,73                 |
| Теплота реакции<br>Reaction heat  | $Q$                          | кДж/кг<br>kJ/kg  | 167  | 437                  |
| Константа автокатализа<br>Autocatalysis factor  | $z_0$                        | —  | 0,9  | 32,9                 |
| Энергия активации реакции автокатализа<br>Activation energy of the autocatalysis reaction | $E_z$                        | Дж/моль<br>J/mol   | 1,9  | 6,6                  |

0,1 м и толщины ее стенки 0,01 м. Так, при температуре 104 °С в начальный момент времени наблюдается саморазогрев внутреннего содержимого колонны на 10 °С, возникающий вследствие протекания реакции  $A \rightarrow B$  (степень превращения достигает порядка 20 %). При этом в точке  $K$  (рис. 4), соответствующей 114 °С, теплоотвод из системы начинает превышать реакционное тепловыделение, что приводит к плавному остыванию до температуры окружающей среды. В другом случае, при начальной температуре 108 °С, саморазогрев происходит за счет протекания реакции  $A \rightarrow B$  и дости-

гает порядка 70 °С. При этом реакция завершается практически на 100 %, однако, температура внутри колонны не достигает необходимой величины для начала второй высокотемпературной реакции  $B \rightarrow C$ . Поэтому после достижения максимума температуры (рис. 4, точка  $L$ , 176 °С) также с течением времени наблюдается плавное остывание системы до температуры окружающей среды. Напротив, при начальной температуре 113 °С реакция  $A \rightarrow B$  завершается на 100 % менее чем за 1 ч, что приводит к росту температуры свыше 200 °С. При этом достигаются температуры протекания реакции

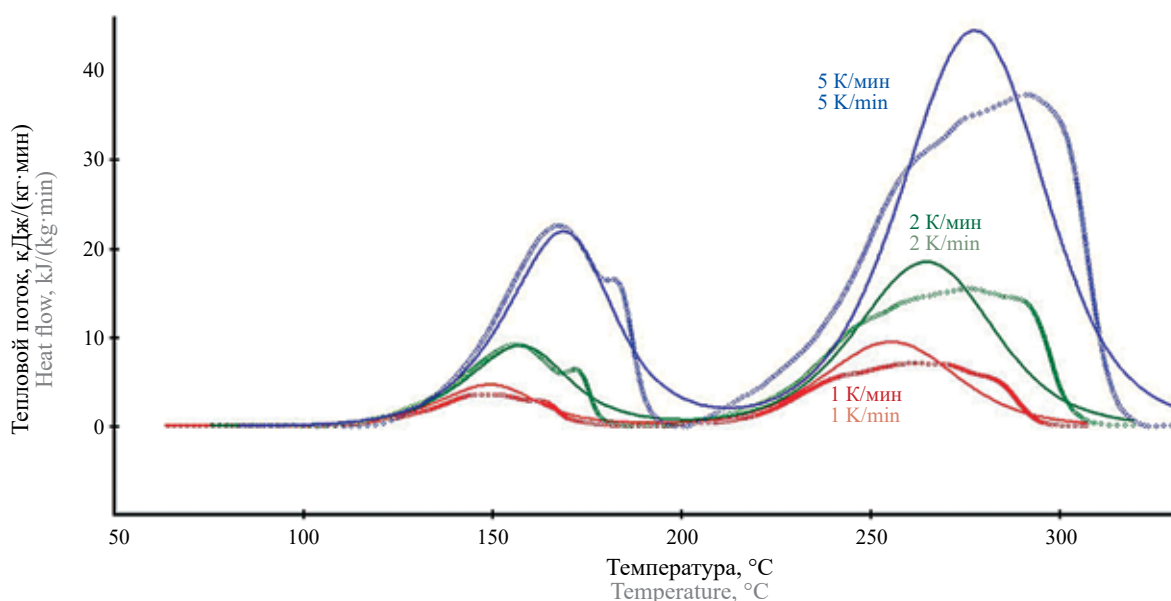
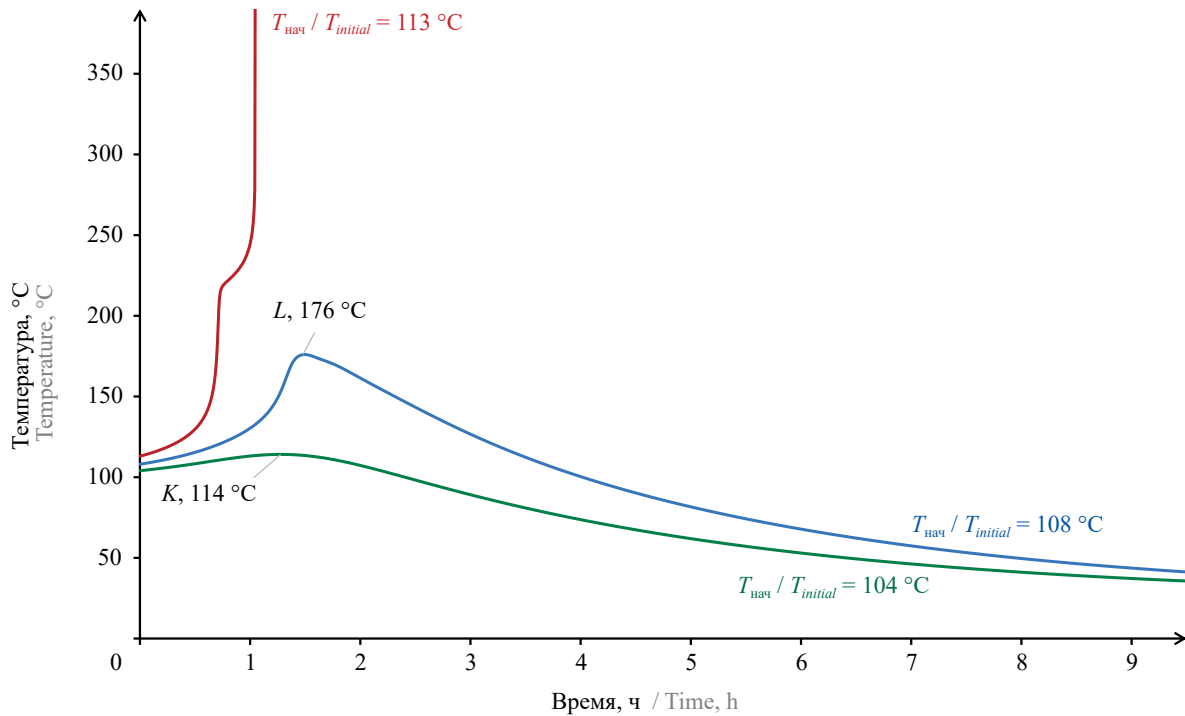


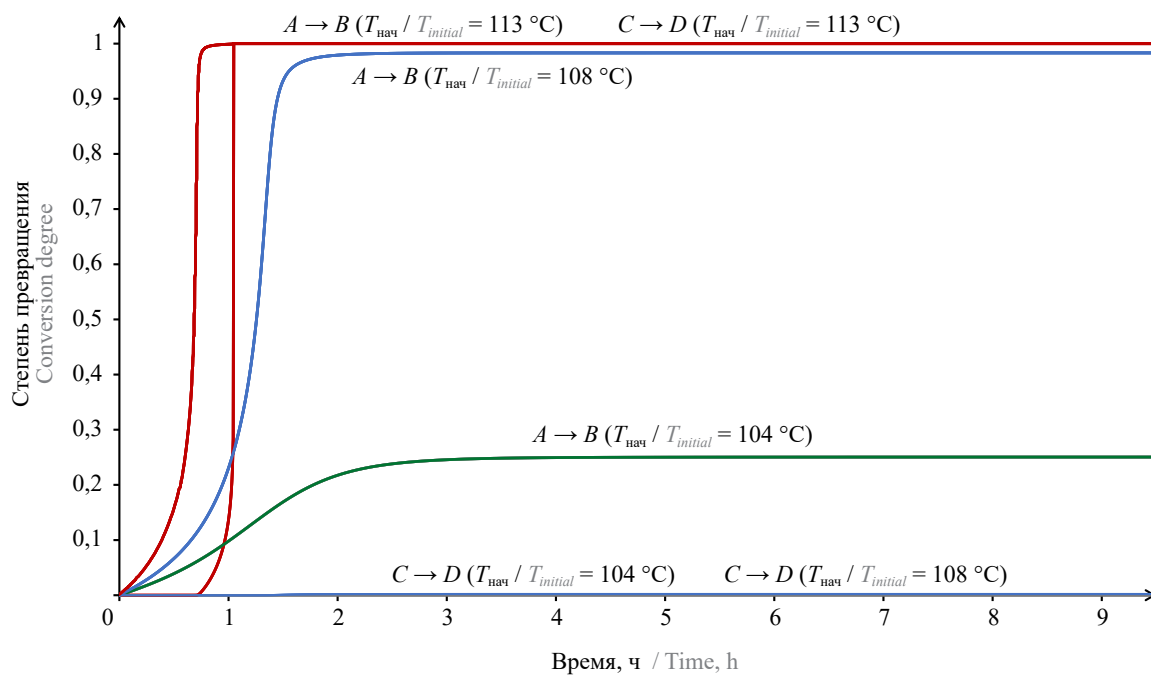
Рис. 3. Экспериментальные данные (точки) разложения смолы АВ-17-8 в нитратной форме и их описание математической моделью (линии)

Fig. 3. Experimental data (dotted lines) of the decomposition of the AV-17-8 anion exchange resin in nitrate form and its description by mathematical model (solid lines)



**Рис. 4.** Расчетное изменение температуры в сорбционной колонне в зависимости от начальной температуры анионита АВ-17-8 в нитратной форме

**Fig. 4.** Calculated temperature change in the sorption column depending on the initial temperature of the AV-17-8 anion exchange resin in nitrate form



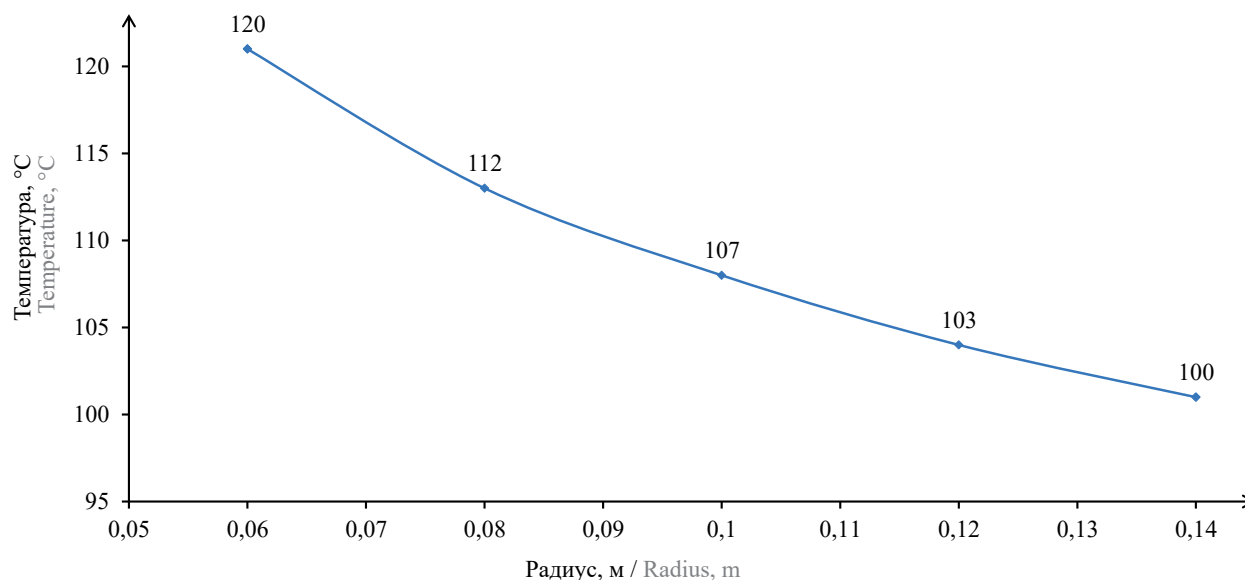
**Рис. 5.** Расчетные кривые превращения реакций  $A \rightarrow B$  и  $C \rightarrow D$  во времени в зависимости от начальной температуры анионита АВ-17-8 в нитратной форме

**Fig. 5.** Calculated conversion curves of the  $A \rightarrow B$  and  $C \rightarrow D$  reactions depending on the initial temperature of the AV-17-8 anion exchange resin in nitrate form

$B \rightarrow C$ , вследствие чего наблюдается дальнейший резкий рост температуры. На основании полученных данных за критическую температуру АВ-17-8, при которой не исключено развитие теплового

взрыва, принимали 108 °С, соответствующую практически полной завершенности реакции  $A \rightarrow B$ .

Таким образом, методом компьютерной оптимизации была оценена критическая температура,



**Рис. 6.** Температура теплового взрыва в сорбционной колонне в зависимости от ее радиуса  
**Fig. 6.** The temperatures of a thermal explosion in the sorption column depending on its radius

при которой не исключено развитие теплового взрыва в оборудовании. Используя данный подход, было показано, что при изменении геометрических размеров колонны возможно изменение граничных условий возникновения теплового взрыва (рис. 6). Установлено, что с увеличением радиуса снижается температура, при которой возможно развитие экзотермических реакций. Следует отметить, что изменение высоты колонны не влияет на данную величину и на критическую температуру, поскольку они лимитируются теплоотдачей из зоны саморазогрева к стенке колонны, а не по высоте. Снижение температуры с ростом радиуса может быть обусловлено тем, что теплоотдача по боковой поверхности колонны прямо пропорциональна ее радиусу, а тепловыделение внутри колонны пропорционально квадрату радиуса колонны.

Установлено, что, помимо радиуса колонны, на величину температуры возникновения теплового взрыва влияет также толщина стенки ( $\delta$ ). С уменьшением  $\delta$  от 1 см до 1 мм температура снижается на 3 °C.

Следует отметить, что, помимо рассмотренных параметров, на температуру возникновения теплового взрыва будут оказывать влияние тепловыделяющие радионуклиды, присутствующие в азотно-кислых средах радиохимических производств, что также необходимо учитывать при определении граничных условий.

### Выводы

Методом дифференциально-сканирующей калориметрии исследована термическая стабильность ани-

онита АВ-17-8 в нитратной форме при скоростях нагрева 1, 2 и 5 К/мин. Установлено, что деструкция смолы сопровождается двухстадийным экзотермическим процессом в температурном диапазоне 100–320 °C. Разложение носит автокаталитический характер, что выражается в снижении температур начала тепловыделения при уменьшении скорости нагрева. Лимитирующей стадией тепловыделения соответствует экзотермический эффект в температурной области 100–200 °C.

Предложена кинетическая модель вида  $A \rightarrow B \rightarrow C$  для математического описания термического разложения исследуемого анионита. Оценены кинетические параметры каждой стадии и показана высокая сходимость экспериментальных данных с расчетными. Методом компьютерного моделирования с использованием программного обеспечения Arks установлено, что при радиусе сорбционной колонны 0,1 м критическая температура составляет 108 °C. Также определена зависимость температуры от геометрических размеров колонны для оценки возникновения теплового взрыва. Установлено, что при увеличении радиуса и толщины колонны снижается температура, тем самым уменьшаются эксплуатационные пределы применения анионита АВ-17-8, поскольку в оборудовании возможно развитие неуправляемых экзотермических реакций при температурах менее 101 °C.

Полученные экспериментальные и расчетные результаты являются важными для оценки пожаро-взрывобезопасного использования анионообменных смол при эксплуатации в сорбционном оборудовании, которые необходимо учитывать при разработке технологических решений, связанных с применением АВ-17-8.

## СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. *Brook B.W., Alonso A., Meneley D.A., Misak J., Bles T., van Erp J.B.* Why nuclear energy is sustainable and has to be part of the energy mix // *Sustainable Materials and Technologies*. 2014. Vol. 1–2. Pp. 8–16. DOI: 10.1016/j.susmat.2014.11.001
2. *Rodríguez-Penalonga L., Moratilla Soria B.Y.* A review of the nuclear fuel cycle strategies and the spent nuclear fuel management technologies // *Energies*. 2017. Vol. 10. No. 8. P. 1235. DOI: 10.3390/en10081235
3. *Глебов А.П.* Развитие атомной энергетики в России и мире с реакторами поколений 3+ и 4 // *Вопросы атомной науки и техники. Серия: Ядерно-реакторные константы*. 2020. № 1. С. 77–93. DOI: 10.55176/2414-1038-2020-1-77-93. EDN NZSJEN.
4. *Адамов Е.О., Асмолов В.Г., Большов Л.А., Иванов В.К.* Двухкомпонентная ядерная энергетика // *Вестник российской академии наук*. 2021. Т. 91. № 5. С. 450–458. DOI: 10.31857/S0869587321050029. EDN OXNFZF.
5. *Оленин Ю.А., Игоревич И.В.* Актуальные научно-технические проблемы атомной энергетики // *Вестник Российской академии наук*. 2019. Т. 89. № 4. С. 335–342. DOI: 10.31857/S0869-5873894335-342. EDN DLNNXZ.
6. *Пензин Р.А., Свитцов А.А.* Развитие технологий обращения с жидкими радиоактивными отходами АЭС // *Радиоактивные отходы*. 2020. № 4 (13). С. 90–98. DOI: 10.25283/2587-9707-2020-4-90-98. EDN BVKZTV.
7. *Адамов Е.О., Мочалов Ю.С., Рачков В.И., Хомяков Ю.С., Кащеев В.А., Хаперская А.В. и др.* Переработка отработавшего ядерного топлива и рециклирование ядерных материалов в двухкомпонентной ядерной энергетике // *Атомная энергия*. 2021. Т. 130. № 1. С. 28–34. EDN QSPXSB.
8. *Abdel Rahman R.O., Metwally S.S., El-Kamash A.M.* Life cycle of ion exchangers in nuclear industry: application and management of spent exchangers // *Handbook of Ecomaterials*. 2019. Vol. 5. Pp. 3709–3732. DOI: 10.1007/978-3-319-68255-6\_108. EDN TRIGLR.
9. *Wang J., Wan Z.* Treatment and disposal of spent radioactive ion-exchange resins produced in the nuclear industry // *Progress in Nuclear Energy*. 2015. Vol. 78. Pp. 47–55. DOI: 10.1016/j.pnucene.2014.08.003. EDN URURSH.
10. *Calmon C.* Explosion hazards of using nitric acid in ion-exchange equipment // *Chemical engineering*. 1980. Vol. 87. No. 23. Pp. 271–274.
11. *Тулунов П.Е., Полянский Н.Г.* Термическая устойчивость анионообменных смол // *Успехи химии*. 1973. Т. 42. № 9. С. 754–771. DOI: 10.1070/RC1973v042n09ABEH002730
12. *Осташкина Е.Е., Савкин А.Е.* Научно-технологическое обоснование выбора способа кондиционирования отработавших радиоактивных ионообменных смол // *Вопросы атомной науки и техники. Серия: Материаловедение и новые материалы*. 2020. № 3 (104). С. 37–50. EDN CWAYAN.
13. *Андреева Е.В., Костов М.А., Наземцева Г.И., Чупрынин С.А.* Анализ и обобщение опыта методов переработки отработавших ионообменных смол // *Энергетические установки и технологии*. 2015. Т. 1. № 1. С. 71–77. EDN VPNTTR.
14. *Wang J., Wan Z.* Treatment and disposal of spent radioactive ion-exchange resins produced in the nuclear industry // *Progress in Nuclear Energy*. 2015. Vol. 78. Pp. 47–55. DOI: 10.1016/j.pnucene.2014.08.003. EDN URURSH.
15. *Li J., Wang J.* Advances in cement solidification technology for waste radioactive ion exchange resins : a review // *Journal of hazardous materials*. 2006. Vol. 135. No. 1–3. Pp. 443–448. DOI: 10.1016/j.jhazmat.2005.11.053. EDN KJXFMF.
16. *Chun U.K., Choi K., Yang K.H., Park J.K., Song M.J.* Waste minimization pretreatment via pyrolysis and oxidative pyrolysis of organic ion exchange resin // *Waste Management*. 1998. Vol. 18. No. 3. Pp. 183–196. DOI: 10.1016/S0956-053X(98)00020-8
17. *Сорокин В.Т., Дёмин А.В., Прохоров Н.А., Великина С.А., Гатауллин Р.М., Меделяев И.А.* Хранение отработавших ионообменных смол низкого и среднего уровня удельной активности в контейнерах типа НЗК без включения в матрицу // *Ядерная и радиационная безопасность*. 2009. № 4 (54). С. 19–22. EDN KXSFXF.
18. *Петров С.С., Гоменюк И.В., Корнюшкина О.В., Матвеев А.В., Родин А.В., Шкурыгин Д.М. и др.* Оценка безопасности применения технологии кондиционирования ОИОС методом их осушки (обезвоживания) // *Радиоактивные отходы*. 2024. № 3 (28). С. 7–18. DOI: 10.25283/2587-9707-2024-3-7-18
19. *Родин А.В., Шелапов К.В., Гёзаян Л.В., Понизов А.В., Шарафутдинов Р.Б.* Оценка условий самовозгорания анионообменных смол в нитратной форме в осушенном виде // *Ядерная и радиационная безопасность*. 2023. № 3 (109). С. 5–19. DOI: 10.26277/SECNRS.2023.109.3.001. EDN PZPUJI.
20. *Бенин А.И.* Программный комплекс «Тепловой взрыв» (TSS). Научные основы и методология. СПб : Литео, 2017. 672 с. EDN KSKSTT.

## REFERENCES

1. Brook B.W., Alonso A., Meneley D.A., Misak J., Bles T. et al. Why nuclear energy is sustainable and has to be part of the energy mix. *Sustainable Materials and Technologies*. 2014; 1-2:8-16. DOI: 10.1016/j.susmat.2014.11.001
2. Rodríguez-Penalonga L., Moratilla Soria B.Y. A review of the nuclear fuel cycle strategies and the spent nuclear fuel management technologies. *Energies*. 2017; 10(8):1235. DOI: 10.3390/en10081235
3. Glebov A.P. Development of nuclear power in Russia and the world with generation 3+ and 4 reactors. *Problems of atomic science and technology series nuclear and reactor constants*. 2020; 1:77-93. DOI: 10.55176/2414-1038-2020-1-77-93. EDN NZSJEN. (rus).
4. Adamov E.O., Asmolov V.G., Bolshov L.A., Ivanov V.K. Two-component nuclear power engineering. *Herald Russian Academy of Sciences*. 2021; 91(5):450-458. DOI: 10.31857/S0869587321050029. EDN OXNFZF. (rus).
5. Olenin Y.A., Il'gisonis V.I. Challenging scientific and technical problems of nuclear power. *Herald of the Russian Academy of Sciences*. 2019; 89(4):335-342. DOI: 10.31857/S0869-5873894335-342. EDN DLNNXZ. (rus).
6. Penzin R.A., Svitsov A.A. Development of Technologies for Handling Liquid Radioactive Waste of Nuclear Power Plants. *Radioactive Waste*. 2020; 4(13):90-98. DOI: 10.25283/2587-9707-2020-4-90-98. EDN BVKZTV. (rus).
7. Adamov E.O., Mochalov Y.S., Rachkov V.I., Khomyakov Y.S., Shadrin A.Y., Kascheev V.A. et al. Spent nuclear fuel reprocessing and nuclear materials recycling in two-component nuclear energy. *Atomic energy*. 2021; 130(1):28-34. EDN QSPXSB. (rus).
8. Abdel Rahman R.O., Metwally S.S., El-Kamash A.M. Life cycle of ion exchangers in nuclear industry: application and management of spent exchangers. *Handbook of Ecomaterials*. 2019; 5:3709-3732. DOI: 10.1007/978-3-319-68255-6\_108. EDN TRIGLR.
9. Wang J., Wan Z. Treatment and disposal of spent radioactive ion-exchange resins produced in the nuclear industry. *Progress in Nuclear Energy*. 2015; 78:47-55. DOI: 10.1016/j.pnucene.2014.08.003. EDN URURSH.
10. Calmon C. Explosion hazards of using nitric acid in ion-exchange equipment *Chemical engineering*. 1980; 87(23):271-274.
11. Tulupov P.E., Polyanskiy N.G. Thermal Stability of Anion-exchange Resins. *Russian Chemical Reviews*. 1973; 42(9):754-771. DOI: 10.1070/RC1973v042n09ABEH002730 (rus).
12. Ostashkina E.E., Savkin A.E. Scientific and technological justification of the choice of a method for conditioning spent radioactive ion exchange resins. *Problems of nuclear science and technology. Series: materials science and new materials*. 2020; 3(104):37-50. EDN CWAYAN. (rus).
13. Andreeva E.V., Kostov M.A., Nazemtseva G.I., Chuprynin S.A. The analysis and generalization experience of methods for wasted ion-exchanging resins processing. *Power plants and technologies*. 2015; 1(1):71-77. EDN VPNTTR. (rus).
14. Wang J., Wan Z. Treatment and disposal of spent radioactive ion-exchange resins produced in the nuclear industry. *Progress in Nuclear Energy*. 2015; 78:47-55. DOI: 10.1016/j.pnucene.2014.08.003. EDN URURSH.
15. Li J., Wang J. Advances in cement solidification technology for waste radioactive ion exchange resins : a review. *Journal of hazardous materials*. 2006; 135(1-3):443-448. DOI: 10.1016/j.jhazmat.2005.11.053. EDN KJXFMM.
16. Chun U.K., Choi K., Yang K.H., Park J.K., Song M.J. Waste minimization pretreatment via pyrolysis and oxidative pyrolysis of organic ion exchange resin. *Waste Management*. 1998; 18(3):183-196. DOI: 10.1016/S0956-053X(98)00020-8
17. Sorokin V.T., Demin A.V., Prohorov N.A., Velikina S.A. Storage of spent ion exchange resins of low and medium specific activity levels in containers of the NPC type without inclusion in the matrix. *Nuclear and radiation safety journal*. 2009; 4(54):19-22. EDN KXSFXF. (rus).
18. Petrov S.S., Gomenyuk I.V., Korniyushkina O.V., Matveenkov A.V., Rodin A.V., Shkurygin D.M. et al. Safety Assessment of a SIER Conditioning Method Based on SIER Dehydration (Dewatering). *Radioactive Waste*. 2024; 3(28):7-18. DOI: 10.25283/2587-9707-2024-3-7-18 (rus).
19. Rodin A.V., Shelamov K.V., Gezalyan L.V., Ponizov A.V., Sharafutdinov R.B. Estimation of conditions of self-ignition of dried anion-exchange resins in nitrate form. *Nuclear and radiation safety journal*. 2023; 3(109):5-19. DOI: 10.26277/SECNRS.2023.109.3.001. EDN PZPUJI. (rus).
20. Benin A.I. *Software Package "Thermal Explosion" (TSS). Scientific Basis And Modelling*. St. Petersburg, Liteo, 2017; 672. EDN KSKSTT. (rus).

Поступила 31.01.2025, после доработки 28.04.2025;

принята к публикации 08.07.2025

Received January 31, 2025; Received in revised form April 28, 2025;

Accepted July 8, 2025

**Информация об авторах**

**КОЩЕЕВА Александра Михайловна**, к.х.н., начальник участка экспериментальных исследований безопасности объектов использования атомной энергии, Научно-технический центр по ядерной и радиационной безопасности (НТЦ ЯРБ), Россия, 107140, г. Москва, ул. Малая Красносельская, 2/8, корп. 5; ORCID: 0009-0003-7393-5173; e-mail: koscheeva@secnrs.ru

**ШЕЛАМОВ Кирилл Владимирович**, младший научный сотрудник, Научно-технический центр по ядерной и радиационной безопасности (НТЦ ЯРБ), Россия, 107140, г. Москва, ул. Малая Красносельская, 2/8, корп. 5; ORCID: 0009-0008-1657-4064; e-mail: shelamov@secnrs.ru

**ПОНИЗОВ Антон Владимирович**, к.т.н., заместитель директора, Научно-технический центр по ядерной и радиационной безопасности (НТЦ ЯРБ); Россия, 107140, г. Москва, ул. Малая Красносельская, 2/8, корп. 5; ORCID: 0009-0007-0961-6759; e-mail: ponizov@secnrs.ru

**Вклад авторов:** *все авторы сделали эквивалентный вклад в подготовку публикации.*  
*Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.*

**Information about the authors**

**Aleksandra M. KOSCHEEVA**, Cand. Sci. (Chem.), Head of the Laboratory for Experimental Research, Division for Safety of Fuel Cycle Facilities, Scientific and engineering centre for nuclear and radiation safety (STC NRS). Malaya Krasnoselskaya st., 2/8 5, Moscow, 107140, Russian Federation; ORCID: 0009-0003-7393-5173; e-mail: koscheeva@secnrs.ru

**Kirill V. SHELAMOV**, junior researcher, Scientific and engineering centre for nuclear and radiation safety (STC NRS), Malaya Krasnoselskaya st., 2/8 5, Moscow, 107140, Russian Federation; ORCID: 0009-0008-1657-4064; e-mail: shelamov@secnrs.ru

**Anton V. PONIZOV**, Cand. Sci. (Eng.), deputy director, Scientific and engineering centre for nuclear and radiation safety (STC NRS), Malaya Krasnoselskaya st., 2/8 5, Moscow, 107140, Russian Federation; ORCID: 0009-0007-0961-6759; e-mail: ponizov@secnrs.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.*

## Статистические данные по частотам возникновения пожаров на различных производственных и складских объектах в РФ

Александр Николаевич Полетаев<sup>1</sup>✉, Валентина Сергеевна Гончаренко<sup>1</sup>,  
Юрий Юрьевич Журавлев<sup>2</sup>, Екатерина Сергеевна Кирик<sup>3</sup>, Михаил Юрьевич Нестеров<sup>2</sup>

<sup>1</sup> 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

<sup>2</sup> Департамент надзорной деятельности и профилактической работы МЧС России, г. Москва, Россия

<sup>3</sup> Институт вычислительного моделирования Сибирского отделения Российской академии наук, г. Красноярск, Россия

### АННОТАЦИЯ

**Введение.** Определение частоты пожаров в производственных и складских зданиях является важной и неотъемлемой частью расчета пожарного риска, оказывающей существенное влияние на конечный результат расчета. Однако принятая в настоящее время методология определения указанной частоты имеет ряд недостатков.

**Цели и задачи.** Целью исследования является формирование реальной статистики пожаров на объектах производственного и складского назначения в Российской Федерации на основе альтернативных данных по частотам пожаров в зависимости от их площади. К основным задачам можно отнести сбор статистических данных и их обработку, в том числе с учетом имеющегося зарубежного опыта, анализ полученных результатов и их интерпретацию.

**Аналитическая часть.** Описаны процессы сбора и обработки статистических данных по пожарам на рассматриваемых объектах в зависимости от площади, проведен их анализ. Получены эмпирические зависимости, описывающие с приемлемой точностью наблюдаемую на практике зависимость частоты пожаров от площади здания для объектов производственного и складского назначения в различных отраслях. Приведены ориентировочные значения предельно допустимой площади для различных зданий класса Ф5 в зависимости от наличия в них систем противопожарной защиты (СПЗ) исходя из условия обеспечения допустимого значения индивидуального пожарного риска для персонала.

**Обсуждение результатов.** Полученные значения предельной площади здания для различных отраслей, определенные на основе новых зависимостей частоты пожара от площади здания, сопоставлены с нормативным значением данных площадей. По итогам предложены некоторые шаги по дальнейшему совершенствованию сферы нормативного регулирования, связанной с расчетами пожарного риска и оснащением объектов СПЗ.

**Выводы.** Полученные в результате сбора и обработки статистических сведений новые зависимости частоты пожаров от площади здания для различных отраслей проанализированы, в том числе, с точки зрения возможности получения допустимых значений пожарного риска на объектах, полностью соответствующих нормативным требованиям. Предложены направления по дальнейшему совершенствованию сферы нормативного регулирования, связанной с расчетами пожарного риска. Полученные в работе новые данные по частотам пожаров рекомендованы для использования при проведении расчетов пожарного риска.

**Ключевые слова:** пожарный риск; частота пожаров; площадь объекта защиты; системы противопожарной защиты

**Для цитирования:** Полетаев А.Н., Гончаренко В.С., Журавлев Ю.Ю., Кирик Е.С., Нестеров М.Ю. Статистические данные по частотам возникновения пожаров на различных производственных и складских объектах в РФ // Пожаровзрывобезопасность/Fire and Explosion Safety. 2025. Т. 34. № 4. С. 42–61. DOI: 10.22227/0869-7493.2025.34.04.42-61

✉ Полетаев Александр Николаевич, e-mail: poletaev350@mail.ru

## Fire frequency statistics for various production and warehouse facilities in the Russian Federation

Alexander N. Poletaev<sup>1</sup>✉, Valentina S. Goncharenko<sup>1</sup>, Yuri Yu. Zhuravlev<sup>2</sup>,  
Ekaterina S. Kirik<sup>3</sup>, Mikhail Yu. Nesterov<sup>2</sup>

<sup>1</sup>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

<sup>2</sup>Department of Supervision and Preventive Work of the Ministry of Emergency Situations of Russia, Moscow, Russian Federation

<sup>3</sup>Institute of computational modelling, Siberian branch of Russian Academic Sciences, Krasnoyarsk, Russian Federation

**ABSTRACT**

**Introduction.** Determining the frequency of fires in industrial buildings and warehouses is an important integral part of fire risk analysis, which greatly impacts its ultimate result. However, the present-day method used to determine this fire frequency has several weaknesses.

**Goals and objectives.** The goal of the article is to generate real fire statistics for production and warehouse facilities in the Russian Federation on the basis of alternative fire frequency data depending on the area of such facilities. The main objectives include collecting and processing statistical data, and also analyzing and interpreting results with due regard for international experience.

**Methods.** Processes of collecting and processing fire statistics for production and warehouse facilities are described depending on their areas; fire statistics is analyzed. The authors identified empirical dependencies, describing with acceptable accuracy the relationship between the fire frequency and the floor area of buildings used as production and warehouse facilities in various industries.

**Conclusions.** Dependencies between the fire frequency and the building area are identified for various industries. These dependencies are based on statistics, which are collected, processed, and analyzed, also from the viewpoint of obtainability of acceptable fire risk values at facilities that fully comply with regulatory requirements. Methods are proposed to improve regulations applying to fire risk analysis. New fire frequency data, provided in this work, are recommended for use in fire risk analysis.

**Keywords:** fire risk; fire frequency; area of the asset to be protected; fire safety systems

**For citation:** Poletaev A.N., Goncharenko V.S., Zhuravlev Yu.Yu., Kirik E.S., Nesterov M.Yu. Fire frequency statistics for various production and warehouse facilities in the Russian Federation. *Pozharovzryvobezopasnost/ Fire and Explosion Safety*. 2025; 34(4):42-61. DOI: 10.22227/0869-7493.2025.34.04.42-61 (rus).

✉ Alexander Nikolaevich Poletaev, e-mail: poletaev350@mail.ru

**Введение**

Определение частоты пожаров в различных производственных и складских зданиях и помещениях является неотъемлемой частью проведения расчета пожарного риска для объектов защиты по Методике [1]. При этом значение указанной частоты существенным образом влияет на конечную величину индивидуального пожарного риска для работников предприятия. В свою очередь, в соответствии с положениями Регламента [2] пожарный риск является основной количественной мерой уровня пожарной опасности объекта.

Согласно п. 16 Методики [1], для определения частоты реализации пожароопасных ситуаций, как правило, должны использоваться статистические данные по аварийности или расчетные данные по надежности технологического оборудования, соответствующие специфике рассматриваемого объекта, приведенные в справочных источниках информации. При отсутствии указанных данных информация о частотах реализации пожароопасных ситуаций (в том числе возникших в результате ошибок работника), необходимая для оценки риска, берется из данных о функционировании исследуемого объекта или из данных о функционировании других подобных объектов или используются сведения по частотам реализации инициирующих пожароопасные ситуации событий для некоторых типов оборудования объектов, частотам утечек из технологических трубопроводов, а также частотам возникновения пожаров в зданиях, указанные в приложении № 1 к Методике [1].

Согласно п. 40 Методики, для здания (помещения) в качестве расчетного допускается рассматривать один наиболее неблагоприятный сценарий пожара. При этом расчетная частота этого сценария

пожара должна приниматься равной суммарной частоте реализации всех возможных в здании (помещении) сценариев пожара.

Согласно п. 7 Приложения 1 Методики [1], частоты возникновения пожаров в здании  $Q$  (год<sup>-1</sup>), за исключением случаев, предусмотренных п. 9 и 13 указанного приложения, определяются по формуле:

$$Q = a_1 \cdot F, \quad (1)$$

где  $a_1$  — константа (по смыслу — частота возникновения пожаров в зданиях (помещениях) на единицу площади), определяемая для различных зданий (помещений) по табл. П1.3 Методики [1];  $F$  — площадь здания (помещения), м<sup>2</sup>.

В случаях, когда таблица П1.3 не содержит необходимых данных, а площадь зданий (помещений) превышает 10 000 м<sup>2</sup>, частота возникновения пожара определяется по формуле:

$$Q = a \cdot F^b, \quad (2)$$

где  $a$ ,  $b$  — константы, определяемые для различных зданий (помещений) объекта по таблице П1.4 Методики [1];

$F$  — площадь здания (помещения), м<sup>2</sup>.

Аналогичные соотношения для определения частоты пожаров на производственных объектах содержатся в Пособии [3].

Таким образом, согласно положениям Методики [1], при отсутствии иных официально опубликованных данных, для зданий (помещений) площадью менее 10 000 м<sup>2</sup> предлагается определять частоту пожара по формуле (1), согласно которой частота пожара линейно увеличивается с ростом площади. Для объектов большей площади допус-

кается использовать формулу (2), где зависимость от площади уже степенная.

Вместе с тем легко убедиться, что обе предложенные зависимости дают значения частот, не позволяющие начиная с некоторой относительно небольшой площади здания получить нормативную величину пожарного риска (не более  $10^{-6}$  в год) практически для любых типичных объектов класса ФПО Ф5 при наличии всех требуемых по нормам систем противопожарной защиты (СПЗ). При этом критическое значение площади объекта, начиная с которого величина риска превышает  $10^{-6}$  в год, как правило, существенно меньше предельно допустимой площади объекта, определяемой согласно нормативным требованиям к максимально допустимой площади этажа в пределах пожарного отсека.

Примечательно, что для действующих объектов значительной площади частота пожаров, определенная по Методике [1], может достигать до нескольких пожаров в год, что, очевидно, не соответствует действительности.

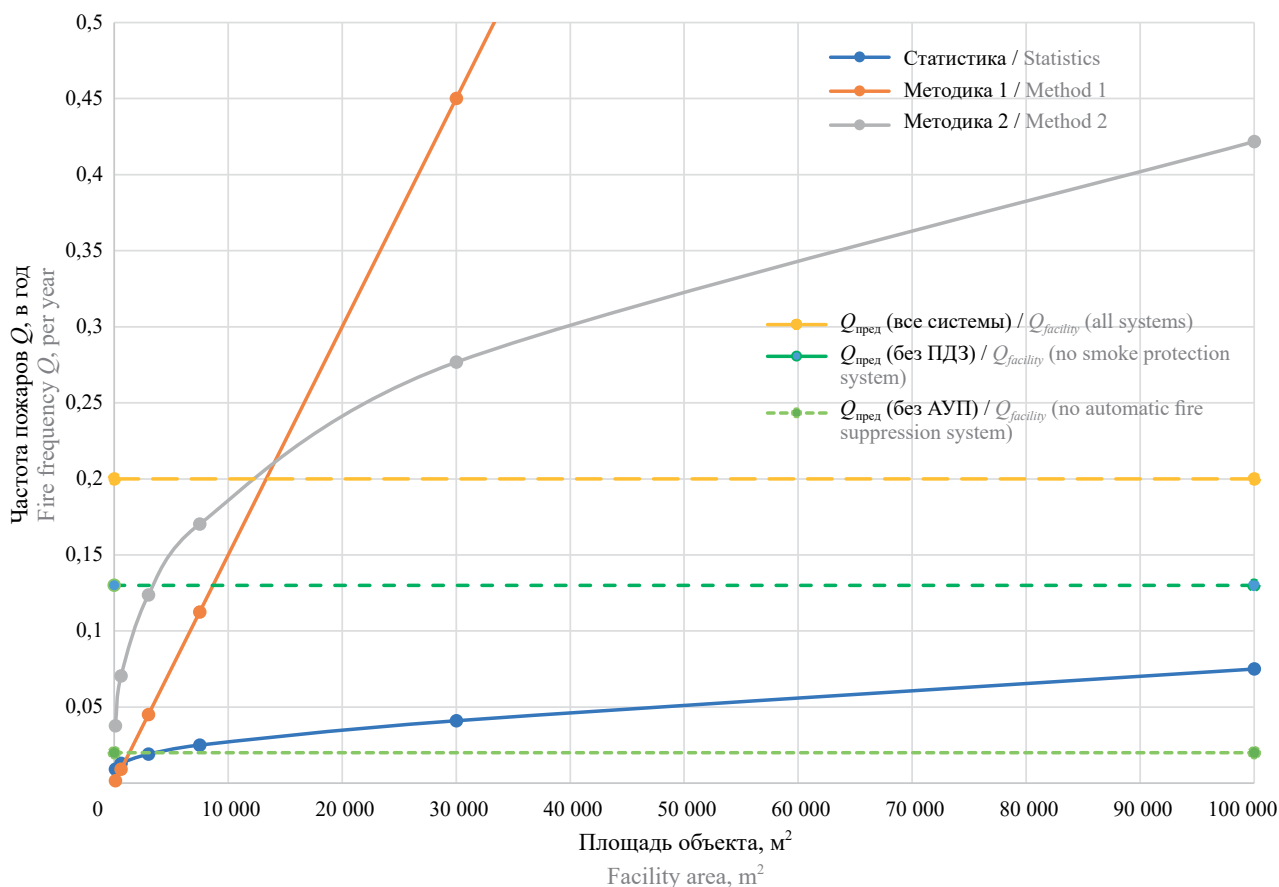
В качестве иллюстрации приведем на рисунке упомянутые выше зависимости частоты пожаров от площади объекта для текстильной промышленности (кривая Методика 1 — линейная зависимость, кривая Методика 2 — степенная зависимость). Забе-

гая вперед, отметим на этом же графике значения (кривая Статистика), полученные в процессе анализа имеющихся статистических данных по объектам текстильной промышленности.

Горизонтальными пунктирными линиями на рисунке отмечены частоты пожаров ( $Q$ , год<sup>-1</sup>), соответствующие значению индивидуального пожарного риска  $10^{-6}$  в год (при характерной вероятности присутствия работника в здании в течение года  $q = 0,21$ ) для случаев наличия всех СПЗ на объекте ( $Q = 0,2$ ), отсутствия только ПДЗ ( $Q = 0,13$ ) и отсутствия только АУП ( $Q = 0,02$ ).

Из графика, в частности, следует, что, согласно частотным зависимостям из Методики, для объектов текстильной промышленности с наличием всех СПЗ (СПС, СОУЭ, АУП, ПДЗ) при площади здания более 13 тыс. м<sup>2</sup> значение пожарного риска для персонала уже превышает величину  $10^{-6}$  в год. А, например, при отсутствии на объекте АУП, которая, к слову, не всегда требуется, согласно нормативным требованиям, предельно допустимая площадь здания, при которой значение пожарного риска не превышает  $10^{-6}$  в год, составляет немногим более 1000 м<sup>2</sup>.

При этом имеющиеся данные статистики свидетельствуют, что при наличии в здании рассматриваемой отрасли всех СПЗ значение величины индивиду-



Различные зависимости частоты пожаров от площади здания для объектов текстильной промышленности  
 Different dependences of the frequency of fires on the building area for textile industry facilities

ального пожарного риска будет менее  $10^{-6}$  при любых разумных площадях здания. Но при отсутствии в здании, например, АУП предельно допустимая площадь здания, при которой расчетная величина пожарного риска будет находиться в допустимом консервативном диапазоне, составляет около 4 тыс. м<sup>2</sup>.

Таким образом, существующую ситуацию с определением частот пожаров на объектах класса Ф5 сложно назвать объективной, в связи с чем в данной статье будет проведен анализ статистики пожаров на указанных объектах в Российской Федерации (на основании доступных авторам статистических сведений) и предложены альтернативные данные по частотам пожаров, которые можно будет обоснованно использовать при проведении расчетов пожарного риска.

Методология определения частоты возникновения пожаров на различных объектах, используемая за рубежом, рассматривалась в работах [4, 5]. Было показано, что в Англии и США для определения частоты пожаров допускается использовать формулу вида (2) с коэффициентами, полученными из данных статистики о пожарах в зданиях, расположенных в Европе в середине XX в. [6–8].

Согласно работе [5], при выводе этой формулы был проведен экономический анализ в части страховых выплат при пожарах, которые коррелировались с площадью застрахованного здания [9, 10].

Статистические данные [11–13] подтверждают, что количество пожаров в зданиях, в зависимости от их площади, возрастает не линейно, а по степенной функции.

Представленный на рис. 1 график, полученный после анализа данных отечественной статистики, в первом приближении подтверждает возможность аппроксимации зависимости частоты пожаров от площади объекта степенной функцией.

Соответственно, следуя сложившимся традициям, в настоящей работе авторы будут использовать формулу вида (2) для описания зависимости частоты пожаров от площади здания.

Цель данного исследования — определить влияние площади объекта на частоту пожаров для различных объектов производственного и складского назначения в Российской Федерации. К основным задачам относятся сбор статистических данных и их обработка, в том числе с учетом имеющегося зарубежного опыта, анализ полученных результатов и их интерпретация.

### **Аналитическая часть. Сбор и обработка статистических данных**

Согласно сложившейся практике регистрируемые на местах территориальными надзорными органами МЧС России данные по произошедшим в стране пожарам поступают во ФГБУ ВНИИПО МЧС Рос-

сии (ВНИИПО) в виде заполненных карточек пожара, которые затем обрабатываются, позволяя получить различную статистическую информацию, часть которой ежегодно публикуется институтом в виде статистических сборников [14, 15]. Примечательно, что с 2023 г. стала доступна информация об общей площади здания (объекта), на котором произошел пожар, что сделало в принципе возможным выполнить настоящее исследование.

Таким образом, основным источником статистических сведений по количеству пожаров на объектах различных отраслей в данной работе явилась база данных ВНИИПО за 2023–2024 гг., в которой отражены площади объектов, на которых произошли пожары, и на основе которой был сформирован ежегодный статистический сборник [15]. При определении среднего количества пожаров также использовалась база данных ВНИИПО по пожарам за 2009–2022 гг.

Но, очевидно, для оценки частоты или вероятности пожара на объектах того или иного вида, помимо информации о ежегодном количестве пожаров требуются данные об общем количестве объектов различного вида в стране.

Соответствующие данные (об их полноте судить сложно) содержатся в автоматизированной аналитической системе поддержки и управления контрольно-надзорными органами МЧС России (далее — ААС КНД) [16]. ААС КНД представляет собой одну из информационных систем, предназначенную для автоматизации контрольно-надзорной деятельности МЧС России и обеспечения взаимодействия в электронном виде с единым порталом государственных услуг, государственной информационной системой о государственных и муниципальных платежах, единым реестром проверок, системой досудебного обжалования, государственной автоматизированной системой «Управление» и заинтересованными федеральными органами исполнительной власти через систему межведомственного информационного взаимодействия [17–19].

При этом в качестве некоторого ориентира, при анализе получаемых статистических данных также учитывались сведения по общему количеству производственных и складских объектов, а также по количеству пожаров на данных объектах в целом, полученные из программного средства «Калькулятор отнесения объектов защиты к определенной категории риска при осуществлении федерального государственного пожарного надзора» (далее — «Калькулятор риска») [20], разработанного специалистами ВНИИПО во исполнение приказа МЧС России от 14 декабря 2020 г. № 947 [21].

Помимо информации об общем количестве объектов различного вида в стране, для определения фактической зависимости частоты пожара от пло-

щадя объекта требуется информация о распределении существующих объектов по площадям, которая, к радости авторов данной статьи, также может быть получена из АСС КНД.

В рамках работы над статьей был сделан соответствующий запрос через ДНПР МЧС России в подразделение ГПН, сопровождающее функционирование АСС КНД, после чего была предоставлена вся запрашиваемая информация.

Помимо общего числа объектов той или иной отрасли, запрашивалось количество объектов в различных диапазонах площадей, из которых в расчетах впоследствии использовались следующие диапазоны (м<sup>2</sup>), признанные оптимальными:

- менее 200;
- от 200 до 1000;

- от 1000 до 5000;
- от 5000 до 10 000;
- от 10 000 до 50 000;
- более 50 000.

Далее в базе данных ВНИИПО за 2023–2024 гг. запрашивалось количество пожаров для объектов каждой отрасли в каждом диапазоне площадей.

Используемые в настоящей работе исходные данные, полученные из АСС КНД и отдела статистики ВНИИПО, приведены в табл. 1.

После несложной обработки полученных данных: среднее количество пожаров в год (за 2023–2024 гг.) в каждом диапазоне площади делилось на количество объектов соответствующего вида из данного диапазона — были получены сведения по фактичес-

**Таблица 1.** Статистические сведения по количеству основных производственных и складских объектов защиты различной площади (источник — АСС КНД) и по количеству пожаров на них за 2023 и 2024 гг., а также по среднему количеству пожаров на рассматриваемых объектах за 2009–2021 гг. (источник — отдел статистики ВНИИПО)

Table 1. Statistics on the main production and warehouse facilities to be protected (extracted from the Automated analytical support and management system of the Russian Ministry of Emergency Situations, hereinafter Automated System), the number of fires there in 2023 and 2024, and the average number of fires there in 2009–2021 (provided by Statistics Department, All-Russian Research Institute for Fire Protection of Ministry of Russian Federation for Civil Defense, Emergencies and Elimination of Consequences of Natural Disasters)

| Объект пожара<br>Facility on fire   | Площадь<br>объекта пожара<br>(средняя<br>площадь),<br>тыс. м <sup>2</sup><br>Facility floor area<br>(average floor<br>area),<br>thousand m <sup>2</sup> | Количество<br>пожаров, ед., $P$<br>Number of fires,<br>fires, $P$ |      | Количество<br>объектов,<br>ед., $N$<br>Number<br>of facilities,<br>facilities, $N$ | Ориенти-<br>ровочная общая<br>площадь<br>зданий, м <sup>2</sup><br>$S_{об}$<br>Approximate<br>total floor<br>area, m <sup>2</sup><br>$S_{total}$ | Ориенти-<br>ровочное<br>общее<br>количество<br>зданий,<br>$N_{об}$<br>Approximate<br>total number<br>of buildings,<br>$N_{total}$ | Среднее коли-<br>чество пожаров<br>в год<br>за 2023–2024,<br>$P_{cp}$ /за 2009–<br>2021, $P_{cp.об}$<br>Average number<br>of fires a year<br>in 2023–2024,<br>$P_{av}$ /in 2009–<br>2021, $P_{total av}$ |
|---|---|---|------|--|--|---|--|
|   |   | 2023  | 2024 |  |  |   |  |
| Здание (соору-<br>жение) легкой<br>промышленности<br>(текстильная, коже-<br>венная, швейная<br>и аналогичные)<br>Building (structure)<br>for a textile indus-<br>try facility (textile,<br>leather, clothing, etc.) | Менее 0,2 (0,1)<br>Below 0.2 (0.1)  | 14  | 14   | 1537   | 43 300 000   | 9800  | 130/49   |
|   | 0,2–1 (0,6)   | 47  | 34   | 3090   |  |   |  |
|   | 1–5 (3)   | 46  | 44   | 2350   |  |   |  |
|   | 5–10 (7,5)  | 7   | 13   | 406  |  |   |  |
|   | 10–50 (30)  | 11  | 13   | 291  |  |   |  |
|   | Более 50<br>Above 50  | 4   | 2    | 40   |  |   |  |
|   | Не указана<br>Not available   | 4   | 13   | 2142   |  |   |  |
| Здание (соору-<br>жение) химической<br>промышленности<br>Chemical industry<br>building (structure)  | Менее 0,2 (0,1)<br>Below 0.2 (0.1)  | 3   | 4    | 1083   | 17 000 000   | 7300  | 51/32  |
|   | 0,2–1 (0,6)   | 18  | 19   | 2101   |  |   |  |
|   | 1–5 (3)   | 19  | 20   | 1614   |  |   |  |
|   | 5–10 (7,5)  | 6   | 4    | 265  |  |   |  |
|   | 10–50 (30)  | 3   | 4    | 185  |  |   |  |
|   | Более 50<br>Above 50  | 0   | 1    | 34   |  |   |  |
|   | Не указана<br>Not available   | 4   | 1    | 2043   |  |   |  |

Продолжение табл. 1 / Continue of the Table 1

| Объект пожара<br>Facility on fire   | Площадь<br>объекта пожара<br>(средняя<br>площадь),<br>тыс. м <sup>2</sup><br>Facility floor area<br>(average floor<br>area),<br>thousand m <sup>2</sup> | Количество<br>пожаров, ед., <i>P</i><br>Number of fires,<br>fires, <i>P</i> |      | Количество<br>объектов,<br>ед., <i>N</i><br>Number<br>of facilities,<br>facilities, <i>N</i> | Ориенти-<br>ровочная общая<br>площадь<br>зданий, м <sup>2</sup><br><i>S</i> <sub>об</sub><br>Approximate<br>total floor<br>area, m <sup>2</sup><br><i>S</i> <sub>total</sub> | Ориенти-<br>ровочное<br>общее<br>количество<br>зданий,<br><i>N</i> <sub>об</sub><br>Approximate<br>total number<br>of buildings,<br><i>N</i> <sub>total</sub> | Среднее коли-<br>чество пожаров<br>в год<br>за 2023–2024,<br><i>P</i> <sub>ср</sub> /за 2009–<br>2021, <i>P</i> <sub>ср.об</sub><br>Average number<br>of fires a year<br>in 2023–2024,<br><i>P</i> <sub>av</sub> /in 2009–<br>2021, <i>P</i> <sub>total av</sub> |
|---|---|---|------|--|--|---|--|
|   |   | 2023  | 2024 |  |  |   |  |
| Здание (сооруже-<br>ние) для хранения<br>непродовольствен-<br>ных товаров (база,<br>хранилище и анало-<br>гичные)<br>Building (structure)<br>for storing non-food<br>products (a ware-<br>house, a storage<br>facility, etc.)   | Менее 0,2 (0,1)<br>Below 0.2 (0.1)  | 50  | 47   | 7185   | 63 600 000   | 30 200  | 270/158  |
|   | 0,2–1 (0,6)   | 96  | 100  | 11 056   |  |   |  |
|   | 1–5 (3)   | 71  | 104  | 5540   |  |   |  |
|   | 5–10 (7,5)  | 9   | 10   | 765  |  |   |  |
|   | 10–50 (30)  | 12  | 12   | 820  |  |   |  |
|   | Более 50<br>Above 50  | 2   | 3    | 141  |  |   |  |
|   | Не указана<br>Not available   | 26  | 15   | 4634   |  |   |  |
| Здание (сооруже-<br>ние) для хранения<br>продовольствен-<br>ных товаров (база,<br>хранилище и анало-<br>гичные)<br>Building (structure)<br>for storing food<br>products (a ware-<br>house, a storage<br>facility, etc.)   | Менее 0,2 (0,1)<br>Below 0.2 (0.1)  | 12  | 11   | 2122   | 31 700 000   | 9800  | 70/114   |
|   | 0,2–1 (0,6)   | 29  | 25   | 3419   |  |   |  |
|   | 1–5 (3)   | 26  | 27   | 2078   |  |   |  |
|   | 5–10 (7,5)  | 5   | 4    | 335  |  |   |  |
|   | 10–50 (30)  | 1   | 8    | 412  |  |   |  |
|   | Более 50<br>Above 50  | 1   | 1    | 78   |  |   |  |
|   | Не указана<br>Not available   | 6   | 1    | 1385   |  |   |  |
| Здание (сооруже-<br>ние) для хранения<br>промышленных<br>товаров, сырья,<br>промежуточной<br>и готовой продук-<br>ции предприятия<br>(запчастей, комплек-<br>тующих и аналогич-<br>ные)<br>Building (structure)<br>for storing industrial<br>goods, raw mate-<br>rials, intermediate<br>and finished prod-<br>ucts of an enterprise<br>(spare parts, compo-<br>nents, etc.) | Менее 0,2 (0,1)<br>Below 0.2 (0.1)  | 22  | 23   | 3778   | 34 700 000   | 17 500  | 160/122  |
|   | 0,2–1 (0,6)   | 56  | 68   | 6596   |  |   |  |
|   | 1–5 (3)   | 59  | 50   | 3600   |  |   |  |
|   | 5–10 (7,5)  | 7   | 6    | 525  |  |   |  |
|   | 10–50 (30)  | 9   | 6    | 458  |  |   |  |
|   | Более 50<br>Above 50  | 2   | 1    | 64   |  |   |  |
|   | Не указана<br>Not available   | 13  | 16   | 2465   |  |   |  |

| Объект пожара<br>Facility on fire   | Площадь<br>объекта пожара<br>(средняя<br>площадь),<br>тыс. м <sup>2</sup><br>Facility floor area<br>(average floor<br>area),<br>thousand m <sup>2</sup> | Количество<br>пожаров, ед., <i>P</i><br>Number of fires,<br>fires, <i>P</i> |      | Количество<br>объектов,<br>ед., <i>N</i><br>Number<br>of facilities,<br>facilities, <i>N</i> | Ориенти-<br>ровочная общая<br>площадь<br>зданий, м <sup>2</sup><br><i>S</i> <sub>об</sub><br>Approximate<br>total floor<br>area, m <sup>2</sup><br><i>S</i> <sub>total</sub> | Ориенти-<br>ровочное<br>общее<br>количество<br>зданий,<br><i>N</i> <sub>об</sub><br>Approximate<br>total number<br>of buildings,<br><i>N</i> <sub>total</sub> | Среднее коли-<br>чество пожаров<br>в год<br>за 2023–2024,<br><i>P</i> <sub>сп./за 2009–<br/>2021</sub> , <i>P</i> <sub>сп.об</sub><br>Average number<br>of fires a year<br>in 2023–2024,<br><i>P</i> <sub>av/in 2009–<br/>2021</sub> , <i>P</i> <sub>total av</sub> |
|---|---|---|------|--|--|---|---|
|   |   | 2023  | 2024 |  |  |   |   |
| Здание (сооружение)<br>лесной промыш-<br>ленности (лесозаго-<br>товительная, цел-<br>люлозно-бумажная,<br>деревообрабатываю-<br>щая и аналогичные)<br>Forestry industry<br>building (struc-<br>ture) (logging, pulp<br>and paper, wood-<br>working, etc.)         | Менее 0,2 (0,1)<br>Below 0.2 (0.1)  | 96  | 76   | 4636   | 26 900 000   | 18 100  | 432/604   |
|   | 0,2–1 (0,6)   | 187   | 160  | 6792   |  |   |   |
|   | 1–5 (3)   | 108   | 100  | 3037   |  |   |   |
|   | 5–10 (7,5)  | 10  | 9    | 339  |  |   |   |
|   | 10–50 (30)  | 18  | 23   | 262  |  |   |   |
|   | Более 50<br>Above 50  | 2   | 1    | 35   |  |   |   |
| Не указана<br>Not available   | 48  | 28  | 3003 |  |  |   |   |
| Здание (соору-<br>жение) машино-<br>строительной<br>промышленности<br>(автомобильное,<br>авиастроение и ана-<br>логичные)<br>A Machine-building<br>facility (structure)<br>(accommodating<br>automotive, aircraft,<br>and similar industrial<br>enterprises)      | Менее 0,2 (0,1)<br>Below 0.2 (0.1)  | 6   | 12   | 1605   | 69 200 000   | 11 300  | 134/–   |
|   | 0,2–1 (0,6)   | 25  | 23   | 2878   |  |   |   |
|   | 1–5 (3)   | 35  | 42   | 2690   |  |   |   |
|   | 5–10 (7,5)  | 13  | 20   | 697  |  |   |   |
|   | 10–50 (30)  | 24  | 24   | 672  |  |   |   |
|   | Более 50<br>Above 50  | 5   | 15   | 143  |  |   |   |
| Не указана<br>Not available   | 13  | 10  | 2632 |  |  |   |   |
| Здание (сооружение)<br>пищевой промыш-<br>ленности (мясная,<br>алкогольная, молоч-<br>ная, мукомольно-<br>крупяная, рыбная<br>и аналогичные)<br>Food industry build-<br>ing (structure) (meat,<br>alcohol, dairy, mill-<br>ing, fish, and other<br>food products) | Менее 0,2 (0,1)<br>Below 0.2 (0.1)  | 38  | 26   | 2949   | 35 000 000   | 15 800  | 206/128   |
|   | 0,2–1 (0,6)   | 80  | 76   | 5415   |  |   |   |
|   | 1–5 (3)   | 55  | 55   | 3643   |  |   |   |
|   | 5–10 (7,5)  | 8   | 8    | 510  |  |   |   |
|   | 10–50 (30)  | 8   | 12   | 425  |  |   |   |
|   | Более 50<br>Above 50  | 4   | 5    | 56   |  |   |   |
| Не указана<br>Not available   | 19  | 19  | 2755 |  |  |   |   |
| Здание (соору-<br>жение) строительной<br>промышленности<br>(цементное, тепло-<br>изоляционное,<br>бетонное производ-<br>ство и аналогичные)<br>Construction industry<br>building (structure)<br>(cement, thermal<br>insulation, concrete<br>products, etc.)       | Менее 0,2 (0,1)<br>Below 0.2 (0.1)  | 20  | 26   | 2331   | 29 200 000   | 14 000  | 208/–   |
|   | 0,2–1 (0,6)   | 91  | 54   | 4366   |  |   |   |
|   | 1–5 (3)   | 74  | 62   | 3059   |  |   |   |
|   | 5–10 (7,5)  | 15  | 6    | 484  |  |   |   |
|   | 10–50 (30)  | 10  | 10   | 367  |  |   |   |
|   | Более 50<br>Above 50  | 1   | 1    | 47   |  |   |   |
| Не указана<br>Not available   | 24  | 22  | 3342 |  |  |   |   |

Продолжение табл. 1 / Continue of the Table 1

| Объект пожара<br>Facility on fire   | Площадь<br>объекта пожара<br>(средняя<br>площадь),<br>тыс. м <sup>2</sup><br>Facility floor area<br>(average floor<br>area),<br>thousand m <sup>2</sup> | Количество<br>пожаров, ед., <i>P</i><br>Number of fires,<br>fires, <i>P</i> |      | Количество<br>объектов,<br>ед., <i>N</i><br>Number<br>of facilities,<br>facilities, <i>N</i> | Ориенти-<br>ровочная общая<br>площадь<br>зданий, м <sup>2</sup><br><i>S</i> <sub>об</sub><br>Approximate<br>total floor<br>area, m <sup>2</sup><br><i>S</i> <sub>total</sub> | Ориенти-<br>ровочное<br>общее<br>количество<br>зданий,<br><i>N</i> <sub>об</sub><br>Approximate<br>total number<br>of buildings,<br><i>N</i> <sub>total</sub> | Среднее коли-<br>чество пожаров<br>в год<br>за 2023–2024,<br><i>P</i> <sub>ср./за 2009–<br/>2021</sub> , <i>P</i> <sub>ср.об</sub><br>Average number<br>of fires a year<br>in 2023–2024,<br><i>P</i> <sub>av/in 2009–<br/>2021</sub> , <i>P</i> <sub>total av</sub> |
|---|---|---|------|--|--|---|---|
|   |   | 2023  | 2024 |  |  |   |   |
| Здание (сооруже-<br>ние) теплоснабже-<br>ния, газоснабже-<br>ния, газоснабжения<br>(теплоэлектростан-<br>ции (ТЭС), тепло-<br>электроцентрали<br>(ТЭЦ), дизельной<br>электростанции,<br>котельная и анало-<br>гичные)<br>Building (structure)<br>for a heat supply,<br>gas supply facility<br>(thermal power plants<br>(TPP), diesel power<br>plants, boiler houses,<br>etc.) | Менее 0,2 (0,1)<br>Below 0.2 (0.1)  | 95  | 74   | 24 532   | 80 600 000   | 44 700  | 205/250   |
|   | 0,2–1 (0,6)   | 61  | 68   | 10 617   |  |   |   |
|   | 1–5 (3)   | 30  | 25   | 2433   |  |   |   |
|   | 5–10 (7,5)  | 4   | 6    | 298  |  |   |   |
|   | 10–50 (30)  | 4   | 5    | 210  |  |   |   |
|   | Более 50<br>Above 50  | 1   | 1    | 38   |  |   |   |
|   | Не указана<br>Not available   | 12  | 23   | 6532   |  |   |   |
| Здание (сооруже-<br>ние) технического<br>обслуживания<br>транспортных<br>средств, другой тех-<br>ники (автосервис)<br>и аналогичные<br>Building (structure)<br>for the maintenance<br>of vehicles, other<br>equipment (car ser-<br>vice station), etc.  | Менее 0,2 (0,1)<br>Below 0.2 (0.1)  | 44  | 49   | 5130   | 22 600 000   | 19 200  | 213/534   |
|   | 0,2–1 (0,6)   | 94  | 77   | 7477   |  |   |   |
|   | 1–5 (3)   | 45  | 56   | 3223   |  |   |   |
|   | 5–10 (7,5)  | 6   | 5    | 335  |  |   |   |
|   | 10–50 (30)  | 4   | 3    | 206  |  |   |   |
|   | Более 50<br>Above 50  | 0   | 0    | 20   |  |   |   |
|   | Не указана<br>Not available   | 19  | 23   | 2783   |  |   |   |
| Здание (сооруже-<br>ние) черной, цвет-<br>ной металлургии<br>и аналогичные<br>Building (structure)<br>accommodating<br>a ferrous, non-ferrous<br>metal smelter  | Менее 0,2 (0,1)<br>Below 0.2 (0.1)  | 22  | 16   | 1475   | 35 000 000   | 11 700  | 195/114   |
|   | 0,2–1 (0,6)   | 40  | 43   | 2963   |  |   |   |
|   | 1–5 (3)   | 59  | 51   | 3867   |  |   |   |
|   | 5–10 (7,5)  | 21  | 15   | 493  |  |   |   |
|   | 10–50 (30)  | 33  | 30   | 425  |  |   |   |
|   | Более 50<br>Above 50  | 11  | 12   | 84   |  |   |   |
|   | Не указана<br>Not available   | 18  | 18   | 2389   |  |   |   |

| Объект пожара<br>Facility on fire   | Площадь<br>объекта пожара<br>(средняя<br>площадь),<br>тыс. м <sup>2</sup><br>Facility floor area<br>(average floor<br>area),<br>thousand m <sup>2</sup> | Количество<br>пожаров, ед., $P$<br>Number of fires,<br>fires, $P$ |      | Количество<br>объектов,<br>ед., $N$<br>Number<br>of facilities,<br>facilities, $N$ | Ориенти-<br>ровочная общая<br>площадь<br>зданий, м <sup>2</sup><br>$S_{об}$<br>Approximate<br>total floor<br>area, m <sup>2</sup><br>$S_{total}$ | Ориенти-<br>ровочное<br>общее<br>количество<br>зданий,<br>$N_{об}$<br>Approximate<br>total number<br>of buildings,<br>$N_{total}$ | Среднее коли-<br>чество пожаров<br>в год<br>за 2023–2024,<br>$P_{ср}/$ за 2009–<br>2021, $P_{ср.об}$<br>Average number<br>of fires a year<br>in 2023–2024,<br>$P_{av}$ in 2009–<br>2021, $P_{total av}$ |
|---|---|---|------|--|--|---|---|
|   |   | 2023  | 2024 |  |  |   |   |
| Здание (сооруже-<br>ние) эксплуатации,<br>технического обслу-<br>живания и ремонта<br>систем инженерно-<br>технического обес-<br>печения (насосная,<br>компрессорная,<br>электротрансформа-<br>торной подстанции<br>и аналогичные)<br>Building (struc-<br>ture) for the oper-<br>ation, maintenance<br>and repair of engi-<br>neering and engineer-<br>ing support systems<br>(pumping room,<br>compressor room,<br>electric transformer<br>substation, etc.) | Менее 0,2 (0,1)<br>Below 0.2 (0.1)  | 45  | 74   | 8655   | 13 300 000   | 19 200  | 110/–   |
|   | 0,2–1 (0,6)   | 27  | 20   | 4918   |  |   |   |
|   | 1–5 (3)   | 16  | 11   | 1749   |  |   |   |
|   | 5–10 (7,5)  | 4   | 2    | 204  |  |   |   |
|   | 10–50 (30)  | 1   | 1    | 110  |  |   |   |
|   | Более 50<br>Above 50  | 0   | 1    | 20   |  |   |   |
|   | Не указана<br>Not available   | 11  | 6    | 3534   |  |   |   |
| Здание (сооруже-<br>ние) для хранения<br>лесопиломатериалов<br>Building (structure)<br>for storing lumber   | Менее 0,2 (0,1)<br>Below 0.2 (0.1)  | 26  | 26   | 923  | 8 000 000  | 3700  | 100/72  |
|   | 0,2–1 (0,6)   | 41  | 48   | 1417   |  |   |   |
|   | 1–5 (3)   | 23  | 13   | 501  |  |   |   |
|   | 5–10 (7,5)  | 2   | 0    | 59   |  |   |   |
|   | 10–50 (30)  | 0   | 2    | 58   |  |   |   |
|   | Более 50<br>Above 50  | 0   | 0    | 13   |  |   |   |
|   | Не указана<br>Not available   | 15  | 4    | 711  |  |   |   |
| Здание, сооруже-<br>ние выращивания<br>и содержания<br>животных<br>(животноводческая,<br>птицеводческая,<br>звероводческая<br>ферма и анало-<br>гичные)<br>Building or facility<br>for raising and keep-<br>ing animals (live-<br>stock, poultry, animal<br>husbandry, etc.)  | Менее 0,2 (0,1)<br>Below 0.2 (0.1)  | 16  | 23   | 4528   | 118 300 000  | 23 300  | 152/355   |
|   | 0,2–1 (0,6)   | 57  | 52   | 8152   |  |   |   |
|   | 1–5 (3)   | 50  | 76   | 6916   |  |   |   |
|   | 5–10 (7,5)  | 4   | 3    | 345  |  |   |   |
|   | 10–50 (30)  | 3   | 4    | 311  |  |   |   |
|   | Более 50<br>Above 50  | 0   | 0    | 46   |  |   |   |
|   | Не указана<br>Not available   | 9   | 8    | 3006   |  |   |   |

| Объект пожара<br>Facility on fire  | Площадь<br>объекта пожара<br>(средняя<br>площадь),<br>тыс. м <sup>2</sup><br>Facility floor area<br>(average floor<br>area),<br>thousand m <sup>2</sup> | Количество<br>пожаров, ед., $P$<br>Number of fires,<br>fires, $P$ |      | Количество<br>объектов,<br>ед., $N$<br>Number<br>of facilities,<br>facilities, $N$ | Ориенти-<br>ровочная общая<br>площадь<br>зданий, м <sup>2</sup><br>$S_{об}$<br>Approximate<br>total floor<br>area, m <sup>2</sup><br>$S_{total}$ | Ориенти-<br>ровочное<br>общее<br>число<br>зданий,<br>$N_{об}$<br>Approximate<br>total number<br>of buildings,<br>$N_{total}$ | Среднее коли-<br>чество пожаров<br>в год<br>за 2023–2024,<br>$P_{cp}/\text{за } 2009–$<br>$2021, P_{cp,об}$<br>Average number<br>of fires a year<br>in 2023–2024,<br>$P_{av}/\text{in } 2009–$<br>$2021, P_{total av}$ |
|--|---|---|------|--|--|--|--|
|  |   | 2023  | 2024 |  |  |  |  |
| Здание, сооружение<br>сельскохозяйствен-<br>ного растениевод-<br>ства (теплица, пар-<br>ник и аналогичные)<br>Building or structure<br>for agricultural crop<br>production (green-<br>house, etc.) | Менее 0,2 (0,1)<br>Below 0.2 (0.1)  | 34  | 9    | 3074   | 360 000 000  | 12 000   | 55/88  |
|  | 0,2–1 (0,6)   | 22  | 10   | 3460   |  |  |  |
|  | 1–5 (3)   | 10  | 8    | 1076   |  |  |  |
|  | 5–10 (7,5)  | 4   | 1    | 209  |  |  |  |
|  | 10–50 (30)  | 0   | 0    | 200  |  |  |  |
|  | Более 50<br>Above 50  | 1   | 0    | 369  |  |  |  |
|  | Не указана<br>Not available   | 7   | 3    | 3656   |  |  |  |

ким частотам (вероятности) пожаров в зависимости от площади объектов.

Необходимо отметить, что для объектов значительной площади (более 30–50 тыс. м<sup>2</sup>) в связи с относительно малым количеством пожаров в год полученные данные по частотам пожаров могут быть не вполне презентабельными.

При этом в рамках консервативного подхода полученные частоты для каждого диапазона площади умножались на коэффициент  $K$ , равный отношению среднего ежегодного количества пожаров за период 2009–2022 гг. к среднему ежегодному количеству пожаров за 2023–2024 гг. для рассматриваемой отрасли, если значение данного коэффициента превосходило единицу.

В итоге указанное консервативное увеличение частоты пожаров было применено для складов продовольственных товаров ( $K = 1,6$ ), зданий лесной промышленности ( $K = 1,4$ ), зданий теплоснабжения

и газоснабжения ( $K = 1,2$ ), а также для зданий автосервисов ( $K = 2,5$ ).

Для животноводческих зданий и зданий сельскохозяйственного растениеводства (теплица, парник) данный консервативный подход в силу специфики указанных объектов не применялся, при этом значение коэффициента  $K$  для них составило 2,3 и 1,6 соответственно.

Далее более детально остановимся на используемых в работе данных статистики.

Согласно данным статистического сборника [15], за последние годы (2019–2023) среднее количество пожаров в производственных зданиях составляет около 3000 в год, в складских зданиях около 1500 в год, в сельскохозяйственных зданиях около 600 в год.

В 2021–2023 гг. подход к формированию статистических данных неоднократно менялся, чем можно объяснить существенные скачки ежегодного

**Таблица 2.** Общее количество зарегистрированных пожаров в зданиях классов ФПО Ф5.1–Ф5.3 за 2019–2024 гг. согласно статистическому сборнику [15]

| Объект пожара<br>Facility on fire                                | Количество пожаров в год<br>Number of fires a year |      |      |      |      |      |
|--|--|------|------|------|------|------|
|  | 2019   | 2020 | 2021 | 2022 | 2023 | 2024 |
| Здание производственного назначения<br>Production facility       | 3546   | 3438 | 3589 | 1949 | 2168 | 2045 |
| Складское здание<br>Warehouse facility                           | 1579   | 1495 | 1462 | 767  | 2203 | 2259 |
| Здание сельскохозяйственного назначения<br>Agricultural facility | 659  | 690  | 671  | 646  | 286  | 270  |

**Таблица 3.** Общее количество зданий классов ФПО Ф5.1-Ф5.3 и зарегистрированных в них пожаров за 2024 г. согласно калькулятору пожарного риска [20]**Table 3.** Total number of buildings of FPO classes F5.1-F5.3 and fires registered there in 2024 according to [20]

| Тип объекта<br>Type of facility                                   | Количество объектов, ед.<br>Number of facilities, units | Количество пожаров, ед.<br>Number of fires, units |
|---|---|---|
| Объекты производственного назначения<br>Production facility       | 178 126   | 1977  |
| Объекты складского назначения<br>Warehouse facility               | 87 080  | 1616  |
| Объекты сельскохозяйственного назначения<br>Agricultural facility | 33 963  | 287   |

количества пожаров на рассматриваемых объектах в указанный период (табл. 2).

В табл. 3 для сравнения приводятся аналогичные данные из калькулятора пожарного риска [20] за 2024 г.

Отдельно отметим, что в имеющихся в распоряжении ВНИИПО детализированных статистических данных за 2009–2022 гг., учитывающих специфику производства или отрасль, к которой относится объект, в таблице производственных зданий имеется строка «прочие производственные здания», среднее количество пожаров в которой в год составляет порядка 450 (около 15 % от общего числа пожаров в год в производственных зданиях). В соответствующей таблице для складских зданий в строке «прочие складские здания» среднее число пожаров в год составляет порядка 700, что составляет около 40 % от общего числа пожаров в год в складских зданиях.

Анализ состава объектов, входящих в так называемые «прочие», выполненный по информации с карточек пожара для рассматриваемых видов объектов, показал, что для производственного функционала около 30 % прочих объектов представляют собой маломасштабные, в том числе некапитальные объекты, остальные 70 % в целом отвечают характеристикам различных производственных зданий. При этом к производственным зданиям площадью более 300–400 м<sup>2</sup> по косвенным признакам могут быть отнесены около 10 % прочих производственных объектов.

Для складского функционала выяснилось, что около половины в рассматриваемой категории составляют объекты временные, некапитальные и маломасштабные, в том числе относящиеся к частным подсобным хозяйствам (сарай, сеновал, складское помещение, контейнер, навес и прочее), которые не могут быть отнесены к складским зданиям. При этом около 10 % от общего числа «прочих складских объектов», на которых произошли пожары, по косвенным признакам могут быть отнесены к складским зданиям площадью более 300–400 м<sup>2</sup>.

Приняв предположение о доле полноценных зданий в категории «прочие», на которых произошел пожар и подлежащих рассмотрению, в 10 % (как для

производственных объектов, так и для складских) вклад в частоту пожаров от учета «прочих» объектов для любой отрасли будет незначительным и им можно пренебречь, учитывая конечную точность статистических данных в целом.

Вместе с тем, если консервативно принимать во внимание все объекты категории «прочие», за исключением временных, маломасштабных и иных объектов, не относящихся к зданиям (сарай, контейнеры, наружные установки, навесы и прочее), в дальнейших расчетах общее количество пожаров на производственных и складских объектах, полученное из данных статистики для конкретных отраслей, целесообразно увеличить на долю пожаров, приходящуюся на учитываемые «прочие» объекты (которые могут быть отнесены к зданиям).

Если при этом предположить, что подлежащие учету пожары на «прочих» объектах распределены по рассматриваемым отраслевым объектам пропорционально уже полученному из соответствующих статистических данных количеству пожаров на них, то расчетное количество пожаров на производственных объектах каждого вида следует увеличить на 11 %, а на складских на 33 %.

Вместе с тем, как уже отмечалось, строка «прочие объекты» для производственных и складских зданий имеется только в статистических данных с 2009 по 2022 г. В статистических данных за 2023–2024 гг., которые легли в основу полученных в работе зависимостей частоты пожаров от площади объекта, такой строки уже нет. Поверхностный анализ данных по общему числу пожаров на производственных и складских объектах за период с 2019 по 2024 г. с учетом исчезновения в 2023 г. «прочих» объектов не позволяет сделать какие-либо однозначные выводы. Как уже упоминалось выше, в данный период неоднократно менялись правила ведения статистического учета пожаров, что не позволяет отследить влияние исчезновения «прочих объектов» на общее количество пожаров. Так, для производственных зданий количество пожаров в указанный период сократилось в 1,7 раза, а для складских в 2022 г. сократилось в 2 раза, а в следующем 2023 г. увеличилось в 3 раза и осталось на таком же уровне

в 2024 г., увеличившись в итоге в целом за рассматриваемый период почти в 1,5 раза.

Таким образом, отсутствуют достаточные основания для корректировки зависимостей, полученных на основе статистических данных за 2023–2024 гг., в связи с наличием в более ранних данных категории «прочие объекты».

Важно также отметить, что незначительные возгорания, ликвидируемые работниками объекта на ранней стадии без вызова подразделений пожарной охраны, как правило, не регистрируются и, соответственно, не входят в официальную статистику пожаров. Вместе с тем подобные данные и не требуются для целей настоящей работы. При этом, не исключено, что существенные отличия значений частот пожаров, полученных в данной работе, от соответствующих значений, приведенных в методике [1] и заимствованных из зарубежных источников, можно объяснить учетом в зарубежной статистике всех возгораний, включая незначительные.

Дополнительно необходимо отметить следующее обстоятельство. Согласно основным используемым в работе статистическим данным за 2023–2024 гг., из общего числа пожаров для каждого вида объектов для некоторого количества пожаров (от 5 до 12 %) не указана площадь зданий, в которых они произошли. Указанное обстоятельство целесообразно использовать для некоторой разумной корректировки полученных зависимостей частоты пожара от площади объекта на всем ее диапазоне, распределив эти «неопределенные» пожары сообразно цели получить в итоге распределения, описываемые степенной зависимостью с минимальными отклонениями.

С учетом всего изложенного выше были получены значения коэффициентов  $a$  и  $b$  для определения частоты пожаров в зданиях различного назначения в зависимости от их площади по формуле  $Q = a \cdot S^b$  без ограничений для площади объекта. Результаты приведены в табл. 4.

В табл. 5 приведены ориентировочные данные по предельно допустимым площадям зданий раз-

**Таблица 4.** Полученные после обработки статистических данных значения коэффициентов  $a$  и  $b$  для определения частоты пожаров в зданиях класса Ф5 по формуле (2)

**Table 4.** Values of coefficients  $a$  and  $b$  obtained by means of statistical data processing to determine the frequency of fires in class F5 buildings according to formula (2)

| Наименование объекта<br>Type of facility  | $a$      | $b$   |
|---|----------|-------|
| Здание (сооружение) легкой промышленности (текстильная, кожевенная, швейная и аналогичные)<br>Building (structure) for a textile industry facility (textile, leather, clothing, etc.)   | 0,00084  | 0,380 |
| Здание (сооружение) химической промышленности<br>Chemical industry building (structure)   | 0,00308  | 0,175 |
| Здание (сооружение) для хранения непродовольственных товаров (база, хранилище и аналогичные)<br>Building (structure) for storing non-food products (a warehouse, a storage facility, etc.)  | 0,00417  | 0,138 |
| Здание (сооружение) для хранения продовольственных товаров (база, хранилище и аналогичные)<br>Building (structure) for storing food products (a warehouse, a storage facility, etc.)  | 0,00816  | 0,089 |
| Здание (сооружение) для хранения промышленных товаров, сырья, промежуточной и готовой продукции предприятия (запчастей, комплектующих и аналогичные)<br>Building (structure) for storing industrial goods, raw materials, intermediate and finished products of an enterprise (spare parts, components, etc.) | 0,00279  | 0,182 |
| Здание (сооружение) лесной промышленности (лесозаготовительная, целлюлозно-бумажная, деревообрабатывающая и аналогичные)<br>Forestry industry building (structure) (logging, pulp and paper, woodworking, etc.)   | 0,01656  | 0,145 |
| Здание (сооружение) машиностроительной промышленности (автомобильное, авиастроение и аналогичные)<br>Machine-building facility (structure) (accommodating automotive, aircraft, and similar industrial enterprises)   | 0,000416 | 0,443 |
| Здание (сооружение) пищевой промышленности (мясная, алкогольная, молочная, мукомольно-крупяная, рыбная и аналогичные)<br>Food industry building (structure) (meat, alcohol, dairy, milling, fish, and other food products)  | 0,000039 | 0,641 |
| Здание (сооружение) строительной промышленности (цементное, теплоизоляционное, бетонное производство и аналогичные)<br>Construction industry building (structure) (cement, thermal insulation, concrete products, etc.)   | 0,00948  | 0,082 |

| Наименование объекта<br>Type of facility  | <i>a</i> | <i>b</i> |
|---|----------|----------|
| Здание (сооружение) теплоснабжения, газоснабжения (теплоэлектростанции (ТЭС), теплоэлектроцентрали (ТЭЦ), дизельной электростанции, котельная и аналогичные)<br>Building (structure) for a heat supply, gas supply facility (thermal power plants (TPP), diesel power plants, boiler houses, etc.)  | 0,00196  | 0,245    |
| Здание (сооружение) технического обслуживания транспортных средств, другой техники (автосервис) и аналогичные<br>Building (structure) for the maintenance of vehicles, other equipment (car service station), etc.  | 0,01476  | 0,109    |
| Здание (сооружение) черной, цветной металлургии и аналогичные<br>Building (structure) accommodating a ferrous, non-ferrous metal smelter  | 0,000691 | 0,444    |
| Здание (сооружение) эксплуатации, технического обслуживания и ремонта систем инженерно-технического обеспечения (насосная, компрессорная, электротрансформаторной подстанции и аналогичные)<br>Building (structure) for the operation, maintenance and repair of engineering and engineering support systems (pumping room, compressor room, electric transformer substation, etc.) | 0,000935 | 0,273    |
| Здание, сооружение выращивания и содержания животных (животноводческая, птицеводческая, звероводческая ферма и аналогичные)<br>Building or facility for raising and keeping animals (livestock, poultry, animal husbandry, etc.)  | 0,00333  | 0,111    |
| Здание, сооружение сельскохозяйственного растениеводства (теплица, парник и аналогичные)<br>Building or structure for agricultural crop production (a greenhouse, etc.)   | 0,00324  | 0,114    |

**Таблица 5.** Полученные в работе ориентировочные предельно допустимые площади для зданий (пожарных отсеков) класса Ф5 исходя из условия не превышения величиной индивидуального пожарного риска значения  $10^{-6}$  в год

**Table 5.** Approximate maximum permissible areas for class F5 buildings, substantiated by the authors, so that the individual fire risk does not exceed the value of  $10^{-6}$  per year

| Наименование объекта<br>Type of facility   | Предельно допустимая площадь здания без АУП (при наличии остальных учитываемых Методикой [1] СПЗ), м <sup>2</sup><br>Maximum permissible area of a building without an automatic fire-fighting system (if the building has all other fire-fighting systems included in Method [1]), m <sup>2</sup> | Предельно допустимая площадь здания без ПДЗ (при наличии остальных учитываемых Методикой [1] СПЗ), м <sup>2</sup><br>Maximum permissible area of a building without a smoke protection system (if the building has all other fire-fighting systems included in Method [1]), m <sup>2</sup> | Предельно допустимая площадь здания при наличии всех учитываемых Методикой [1] СПЗ, м <sup>2</sup><br>Maximum permissible area of a building that has all fire-fighting systems included in Method [1], m <sup>2</sup> |
|--|--|--|--|
| Здание (сооружение) легкой промышленности (текстильная, кожевенная, швейная и аналогичные)<br>Building (structure) for a textile industry facility (textile, leather, clothing, etc.)      | 4000   | 580 000  | Любая*<br>Any area*  |
| Здание (сооружение) химической промышленности<br>Chemical industry building (structure)  | 45 000   | Любая<br>Any area  | Любая<br>Any area  |
| Здание (сооружение) для хранения непродовольственных товаров (база, хранилище и аналогичные)<br>Building (structure) for storing non-food products (a warehouse, a storage facility, etc.) | 85 000   | Любая<br>Any area  | Любая<br>Any area  |
| Здание (сооружение) для хранения продовольственных товаров (база, хранилище и аналогичные)<br>Building (structure) for storing food products (a warehouse, a storage facility, etc.)       | 25 000   | Любая<br>Any area  | Любая<br>Any area  |

Продолжение табл. 5 / Continue of the Table 5

| Наименование объекта<br>Type of facility  | Предельно допустимая площадь здания без АУП (при наличии остальных учитываемых Методикой [1] СПЗ), м <sup>2</sup><br>Maximum permissible area of a building without an automatic fire-fighting system (if the building has all other fire-fighting systems included in Method [1]), m <sup>2</sup> | Предельно допустимая площадь здания без ПДЗ (при наличии остальных учитываемых Методикой [1] СПЗ), м <sup>2</sup><br>Maximum permissible area of a building without a smoke protection system (if the building has all other fire-fighting systems included in Method [1]), m <sup>2</sup> | Предельно допустимая площадь здания при наличии всех учитываемых Методикой [1] СПЗ, м <sup>2</sup><br>Maximum permissible area of a building that has all fire-fighting systems included in Method [1], m <sup>2</sup> |
|---|--|--|--|
| Здание (сооружение) для хранения промышленных товаров, сырья, промежуточной и готовой продукции предприятия (запчастей, комплектующих и аналогичные)<br>Building (structure) for storing industrial goods, raw materials, intermediate and finished products of an enterprise (spare parts, components, etc.) | 51 000   | Любая<br>Any area  | Любая<br>Any area  |
| Здание (сооружение) лесной промышленности (лесозаготовительная, целлюлозно-бумажная, деревообрабатывающая и аналогичные)<br>Forestry industry building (structure) (logging, pulp and paper, woodworking, etc.)   | 4  | Любая<br>Any area  | Любая<br>Any area  |
| Здание (сооружение) машиностроительной промышленности (автомобильное, авиастроение и аналогичные)<br>Machine-building facility (structure) (accommodating automotive, aircraft, and similar industrial enterprises)   | 6000   | 420 000  | Любая<br>Any area  |
| Здание (сооружение) пищевой промышленности (мясная, алкогольная, молочная, мукомольно-крупяная, рыбная и аналогичные)<br>Food industry building (structure) (meat, alcohol, dairy, milling, fish, and other food products)  | 17 000   | 320 000  | 620 000  |
| Здание (сооружение) строительной промышленности (цементное, теплоизоляционное, бетонное производство и аналогичные)<br>Construction industry building (structure) (cement, thermal insulation, concrete products, etc.)   | 9000   | Любая<br>Any area  | Любая<br>Any area  |
| Здание (сооружение) теплоснабжения, газоснабжения (теплоэлектростанции (ТЭС), теплоэлектроцентрали (ТЭЦ), дизельной электростанции, котельная и аналогичные)<br>Building (structure) for a heat supply, gas supply facility (thermal power plants (TPP), diesel power plants, boiler houses, etc.)            | 13 000   | Любая<br>Any area  | Любая<br>Any area  |
| Здание (сооружение) технического обслуживания транспортных средств, другой техники (автосервис) и аналогичные<br>Building (structure) for the maintenance of vehicles, other equipment (car service), etc.  | 16   | Любая<br>Any area  | Любая<br>Any area  |

| Наименование объекта<br>Type of facility  | Предельно допустимая площадь здания без АУП (при наличии остальных учитываемых Методикой [1] СПЗ), м <sup>2</sup><br>Maximum permissible area of a building without an automatic fire-fighting system (if the building has all other fire-fighting systems included in Method [1]), m <sup>2</sup> | Предельно допустимая площадь здания без ПДЗ (при наличии остальных учитываемых Методикой [1] СПЗ), м <sup>2</sup><br>Maximum permissible area of a building without a smoke protection system (if the building has all other fire-fighting systems included in Method [1]), m <sup>2</sup> | Предельно допустимая площадь здания при наличии всех учитываемых Методикой [1] СПЗ, м <sup>2</sup><br>Maximum permissible area of a building that has all fire-fighting systems included in Method [1], m <sup>2</sup> |
|---|--|--|--|
| Здание (сооружение) черной, цветной металлургии и аналогичные<br>Building (structure) accommodating a ferrous, non-ferrous metal smelter  | 2000   | 130 000  | 350 000  |
| Здание (сооружение) эксплуатации, технического обслуживания и ремонта систем инженерно-технического обеспечения (насосная, компрессорная, электротрансформаторной подстанции и аналогичные)<br>Building (structure) for the operation, maintenance and repair of engineering and engineering support systems (pumping room, compressor room, electric transformer substation, etc.) | 73 000   | Любая<br>Any area  | Любая<br>Any area  |
| Здание, сооружение выращивания и содержания животных (животноводческая, птицеводческая, звероводческая ферма и аналогичные)<br>Building or facility for raising and keeping animals (livestock, poultry, animal husbandry, etc.)  | Любая<br>Any area  | Любая<br>Any area  | Любая<br>Any area  |
| Здание, сооружение сельскохозяйственного растениеводства (теплица, парник и аналогичные)<br>Building or structure for agricultural crop production (a greenhouse, etc.)   | Любая<br>Any area  | Любая<br>Any area  | Любая<br>Any area  |

\* Под «любой» понимается допустимая площадь здания более 1 млн м<sup>2</sup>.

\* "Any area" means any permissible building area exceeding one million square meters.

личного назначения при выполнении условий безопасной эвакуации людей (вероятность эвакуации принята 0,999) и типичной вероятности их присутствия (наличие постоянных рабочих мест) в зависимости от наличия в зданиях СПЗ (с типовой схемой пуска по формуле (9) Методики [1]) исходя из критерия допустимости величины индивидуального пожарного риска (менее  $10^{-6}$  в год). Расчет риска при этом базировался на зависимости частоты пожара от площади здания вида (2) с коэффициентами, представленными в табл. 4.

### Обсуждение результатов

Одним из ожидаемых результатов данной работы было исключение в большинстве случаев получения в результате расчетов недопустимых значений пожарного риска для нормативных объектов класса

Ф5 (площадь и наличие систем противопожарной защиты полностью соответствуют нормативным требованиям, условия безопасной эвакуации людей обеспечены, вероятность присутствия персонала типичная).

Допустимая площадь здания в рамках требований пожарной безопасности зачастую определяется положениями [22], регламентирующими максимально допустимую площадь этажа в пределах пожарного отсека.

Согласно таблице 6.1 [22], для одноэтажных производственных зданий I и II степени огнестойкости площадь этажа в пределах пожарного отсека не ограничена, а для двухэтажных зданий составляет 25 000 м<sup>2</sup>, что соответствует максимальной общей площади такого здания (пожарного отсека) 50 000 м<sup>2</sup>.

Для наиболее часто встречающейся в настоящее время комбинации характеристик производственного здания, а именно — категория В по пожарной опасности, IV степень огнестойкости, класс конструктивной пожарной опасности С0 — предельно допустимая площадь этажа в пределах пожарного отсека составляет 25 000 и 10 400 м<sup>2</sup> для одноэтажных и двухэтажных зданий соответственно.

Согласно таблице 6.3 [22], для одноэтажных складских зданий I, II и III степеней огнестойкости категории В по пожарной опасности площадь этажа в пределах пожарного отсека составляет 10 400 м<sup>2</sup>, для двухэтажных I, II степеней огнестойкости 7800 м<sup>2</sup>.

Для одноэтажного складского здания IV степени огнестойкости, класса конструктивной пожарной опасности С0 и категория В по пожарной опасности предельно допустимая площадь этажа в пределах пожарного отсека составляет 7800 м<sup>2</sup>.

В числе прочего следует учитывать положения СП [22], согласно которым для производственных и складских зданий I–III степеней огнестойкости допускается увеличивать в два раза допустимую площадь этажа в пределах пожарного отсека при условии защиты здания АУП.

Как следует из приведенных выше нормативных требований, допустимые значения площади здания (пожарного отсека) заметно разнятся в зависимости от пожарно-технических и общестроительных характеристик здания, а также наличия в здании АУП. Вместе с тем грубая оценка свидетельствует об актуальности получения в результате расчета допустимых значений пожарного риска для производственных зданий площадью порядка 25 000 м<sup>2</sup> без применения АУП, а для складских зданий площадью порядка 10 000 м<sup>2</sup> без применения АУП.

Из табл. 5 следует, что для ряда производственных отраслей даже такие усредненные требования не выполняются. Для некоторых видов объектов, таких как автосервисы и здания лесной промышленности, без применения АУП риск всегда будет выше 10<sup>-6</sup> в год (впрочем, для автосервисов необходимость обязательного применения АУП может быть оправдана постоянным наличием в этих зданиях дорогостоящего имущества третьих лиц в виде автомобилей граждан). Для зданий черной/цветной металлургии и легкой промышленности предельные значения площадей без АУП составляют порядка 2000 и 4000 м<sup>2</sup> соответственно, что, очевидно, не вполне отвечает сложившимся представлениям о необходимости защиты данных объектов АУП. Достаточно жесткими получились также выводы в отношении зданий машиностроительной и строительной промышленности — предельные значения площадей без АУП составляют для них порядка 6000 и 9000 м<sup>2</sup> соответственно.

Напрашивается вывод, что в ряде случаев, по всей видимости, будет оправдано в качестве предельно допустимого использовать значение пожарного риска 10<sup>-4</sup> в год. В рамках такого подхода следует расширить приведенный в Методике [1] перечень вариантов специфики объекта, допускающих использование указанного предельного значения пожарного риска. Например, к специфике производства, позволяющей применять критерий 10<sup>-4</sup> в год, целесообразно отнести потребность в значительной площади здания без разбиения на пожарные отсеки исходя из технологических или логистических особенностей, при условии умеренного уровня потенциальной пожарной опасности объекта в целом.

Кроме того, необходимо проводить работу по актуализации нормативных документов по пожарной безопасности в части требований по оснащению объектов системами противопожарной защиты, в частности, для АУП и ПДЗ [23, 24]. Необходимо исключать избыточные и морально устаревшие требования, часто являющиеся наследием эпохи плановой экономики и социалистической собственности.

Так, в части требований по защите объектов АУП перспективной в свете затрагиваемых в статье вопросов выглядит возможность нормативно допустить на объектах класса Ф5, подлежащих согласно СП [23] защите АУП, не предусматривать АУП для помещения/здания в целом в тех случаях, когда такая защита технически невозможна или экономически нецелесообразна, при условии, что все участки размещения пожарной нагрузки (агрегаты, оборудование и прочее) защищаются автоматическими установками локально-объемного или локально-поверхностного пожаротушения согласно СП [25].

При этом, разрабатывая и актуализируя нормативные требования к объектам класса Ф5, не стоит забывать, что суммарная гибель людей на них в нашей стране, согласно данным статистики, составляет порядка 100 человек в год, в то время как гибель людей в жилом секторе составляет около 8000 человек в год. Решение проблемы с пожарами в жилом секторе лежит на поверхности и прекрасно зарекомендовало себя в большинстве стран мира еще в прошлом столетии — обязательная защита всех существующих квартир и индивидуальных жилых домов автономными дымовыми пожарными извещателями. Внедрение данного простого и дешевого решения по оценкам специалистов позволит снизить гибель в жилом секторе до двух раз, что перекроет с большим запасом всю гибель на объектах класса Ф5. Но, к сожалению, по непонятным причинам в нашей стране не уделяется должного внимания данной очевидной проблеме, благодаря которой Россия занимает одно из первых мест в мире по гибели

людей на пожарах (в окружении, преимущественно, африканских слаборазвитых государств).

Вместе с тем следует также учитывать, что заимствованная из статистических данных [14–19] и используемая в настоящей работе классификация объектов защиты по отраслям является весьма грубой. Так, объекты, формально относящиеся к химической промышленности, могут существенным образом отличаться по своей потенциальной пожарной опасности и взрывоопасности. Например, производство негорючих минеральных удобрений из негорючего сырья, где фактически гореть нечему, будет значительно менее опасным, чем производство полимеров или синтетических волокон, для которого характерны значительное количество горючей нагрузки, включая ЛВЖ и ГЖ, пожаровзрывоопасные технологические процессы, а также возможность каскадного развития аварии.

Таким образом, определение частоты пожаров на объекте защиты, последующий расчет пожарного риска и принятие по результатам данного расчета решений по применению на объекте АУП и иных систем противопожарной защиты должны выполняться в рамках действующего законодательства в области пожарной безопасности компетентным лицом или проектной организацией на основании

всестороннего и объективного анализа конкретного объекта, с учетом пожеланий заказчика/собственника по сохранности имущества и материальных ценностей в случае возникновения пожара.

## Выводы

Осуществлен сбор статистических данных о пожарах на объектах производственного и складского назначения в Российской Федерации. Выполнена обработка указанных данных, учитывающая имеющийся зарубежный опыт в данной сфере, и произведен анализ полученных результатов, на основании которого получены новые зависимости частоты пожаров от площади здания для различных отраслей. В качестве интерпретации результатов работы приведены ориентировочные значения предельно допустимой площади для различных зданий класса Ф5 в зависимости от наличия в них АУП и ПДЗ исходя из условия не превышения величиной индивидуального пожарного риска значения  $10^{-6}$  в год. Предложены некоторые шаги по дальнейшему совершенствованию сферы нормативного регулирования, связанной с расчетами пожарного риска и оснащением объектов СПЗ. Полученные в работе новые данные по частотам пожаров могут быть использованы при проведении расчетов пожарного риска.

## СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Об утверждении методики определения расчетных величин пожарного риска на производственных объектах. МЧС России : Приказ № 533 от 26.06.2024. URL: <https://normativ.kontur.ru/document?moduleId=1100&documentId=52582>
2. Технический регламент о требованиях пожарной безопасности : Федеральный закон от 22 июля 2008 г. № 123-ФЗ. URL: <https://normativ.kontur.ru/document?moduleId=1&documentId=444219>
3. Пособие по определению расчетных величин пожарного риска для производственных объектов. М. : ВНИИПО, 2019. 242 с.
4. Меркулов А.П., Кожевин Д.Ф. К вопросу определения частоты возникновения пожара в зданиях различных классах функциональной пожарной опасности // Проблемы управления рисками в техносфере. 2022. № 2 (62). С. 34–41. EDN GDZINE.
5. Меркулов А.П., Кожевин Д.Ф. Определение частоты возникновения пожара в зданиях различных классов функциональной пожарной опасности в зависимости от площади здания // Вестник С.-Петербургского Университета ГПС МЧС России. 2022. № 3. С. 34–41. EDN COUIQH.
6. PD 7974-7:2003. Application of fire safety engineering principles to the design of buildings. Probabilistic risk assessment. British Standart Institute. URL: <https://middleware.accord.bsigroup.com/pdf-preview?path=Preview%2F00000000030041517.pdf>
7. Мейнс М., Рау Д. Критическая оценка данных о структурном реагировании на пожар в соответствии со стандартом BS PD 7974-7, основанная на статистике пожаров США // Пожарная техника. 2019. № 55. С. 1243–1293. DOI: 10.1007/s10694-018-0775-2
8. Manes M., Rush D. Assessing fire frequency and structural fire behaviour of England statistics according to BS PD 7974-7 // Fire Safety Journal. 2020. No. 120 (7). P. 103030. DOI: 10.1016/j.firesaf.2020.103030
9. D'Addario R. Considerazioni sul tasso di premio delle assicurazioni incendi. Bari, 1940.
10. Rutstein R. The probability of fire in different sectors of industry // Fire Surv. 1979. No. 8 (1). Pp. 20–23.
11. Manes M., Rush D. Probabilistic fire risk assessment in buildings using event tree analysis based on UK and USA fire statistics // Conference: Interflam. London, UK, 2019. URL: <http://livrepository.liverpool.ac.uk/3142883/>
12. Barnet A., Cheng Ch., Horsan M., He Y., Park L. Fire Load Density Distribution in School Buildings and Statistical Modelling // Fire Technol. 2022. No. 58. Pp. 503–521. DOI: 10.1007/s10694-021-01150-w

13. Meacham B.J., van Straalen I.J. A socio-technical system framework for risk-informed performance-based building regulation // *Building Research & Information*. 2018. No. 46 (4). Pp. 444–462. DOI: 10.1080/09613218.2017.1299525
14. Гончаренко В.С., Четчина Т.А., Сибирко В.И., Надточий О.В., Полехин П.В., Козлов А.А. и др. Пожары и пожарная безопасность в 2022 году : информ.-аналит. сб. Балашиха : ФГБУ ВНИИПО МЧС России, 2023, 80 с. EDN IKFNVG.
15. Гончаренко В.С., Четчина Т.А., Сибирко В.И., Надточий О.В., Полехин П.В., Козлов А.А. и др. Пожары и пожарная безопасность в 2023 году : информ.-аналит. сб. Балашиха : ФГБУ ВНИИПО МЧС России, 2024, 110 с. EDN BSONFO.
16. Шаймитов А.В. Автоматизированная аналитическая система поддержки и управления контрольно-надзорными органами МЧС России как один из видов автоматизации контрольно-надзорной деятельности МЧС России // *Молодой ученый*. 2023. № 38 (485). С. 233–236. EDN XWFZGI.
17. Порсов Д.М., Дунаев Д.К., Харитонов А.Б., Козлов А.А., Еникеев Р.Ш., Полехин П.В. Автоматизированная аналитическая система поддержки и управления контрольно-надзорными органами МЧС России (ААС КНД) // Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ. № RU 2018617462 от 26.02.2018. EDN JDJYFQ.
18. О вводе в эксплуатацию информационной системы «Автоматизированная аналитическая система поддержки и управления контрольно-надзорными органами МЧС России» : Приказ МЧС России от 25.03.2022 № 262.
19. Об утверждении Регламента работы в информационной системе «Автоматизированная аналитическая система поддержки и управления контрольно-надзорными органами МЧС России» : Приказ МЧС России от 04.10.2022 № 954. URL: <https://fireman.club/normative-documents/prikaz-mchs-rossii-954-ot-04-10-2022-ob-utverzhdenii-reglamenta-raboty-v-informacionnoj-sisteme>
20. Руководство пользователя программного средства «Калькулятор отнесения объектов защиты к определенной категории риска при осуществлении федерального государственного пожарного надзора» (калькулятор). ФГБУ ВНИИПО МЧС России, 2020, 11 с. URL: <https://mchs.gov.ru/dokumenty/5099>
21. Об организации проведения расчетов значений показателей для отнесения объектов защиты, находящихся во владении и (или) использовании (эксплуатации) организаций и граждан, к определенной категории риска при осуществлении федерального государственного пожарного надзора : Приказ МЧС России от 14 декабря 2020 г. № 947. URL: [https://static.mchs.gov.ru/uploads/resource/2020-12-30/federalnyu-gosudarstvennyu-pozharnyy-nadzor\\_160932335273782784.pdf](https://static.mchs.gov.ru/uploads/resource/2020-12-30/federalnyu-gosudarstvennyu-pozharnyy-nadzor_160932335273782784.pdf)
22. СП 2.13130.2020. Системы противопожарной защиты. Обеспечение огнестойкости объектов защиты.
23. СП 486.1311500.2020. Перечень зданий, сооружений, помещений и оборудования, подлежащих защите автоматическими установками пожаротушения и системами пожарной сигнализации. Требования пожарной безопасности.
24. СП 7.13130.2013. Отопление, вентиляция и кондиционирование. Требования пожарной безопасности.
25. СП 485.1311500.2020. Системы противопожарной защиты. Установки пожаротушения автоматические. Нормы и правила проектирования.

## REFERENCES

1. Methodology for determining the calculated values of fire risk at industrial facilities : Approved by the order of the Ministry of Emergency Situations of Russia dated 26.06.2024 No. 533. URL: <https://normativ.kontur.ru/document?moduleId=1100&documentId=52582> (rus).
2. Technical regulations on fire safety requirements : Federal Law No. 123-FZ was adopted by the State Duma on 04.07.2008. Approved by the Federation Council on 07.11.2008. URL: <https://normativ.kontur.ru/document?moduleId=1&documentId=444219> (rus).
3. Manual for determining the calculated values of fire risk for industrial facilities. Moscow, VNIPO, 2019 (rus).
4. Merkulov A.P., Kozhev D.F. On the issue of determining the frequency of fire in buildings of various classes of functional fire hazard. *Problems of risk management in the technosphere*. 2022; 2(62):34-41. EDN GDZIEH. (rus).
5. Merkulov A.P., Kozhev D.F. Determination of the frequency of fire in buildings of different classes of functional fire hazard depending on the area of the building. *Bulletin of St. Petersburg State University of the State Fire Service of the Ministry of Emergency Situations of Russia*. 2022; 3:34-41. EDN COUIQH (rus).
6. PD 7974-7:2003. Application of fire safety engineering principles to the design of buildings. Probabilistic risk assessment. URL: <https://middleware.accord.bsigroup.com/pdf-preview?path=Preview%2F000000000030041517.pdf>
7. Manes M., Rush D. A Critical Evaluation of BS PD 7974-7 Structural Fire Response Data Based on USA Fire Statistics. *Fire Technology*. 2018; 55:1243-1293. DOI: 10.1007/s10694-018-0775-2

8. Manes M., Rush D. Assessing fire frequency and structural fire behaviour of England statistics according to BS PD 7974-7. *Fire Safety Journal*. 2021; 120:103030. DOI: 10.1016/j.firesaf.2020.103030
9. D'Addario R. *Considerazioni sul tasso di premio delle assicurazioni incendi*. Bari, 1940.
10. Rutstein R. The probability of fire in different sectors of industry. *Fire Surveyor*. 1979; 8(1):20-23.
11. Manes M., Rush D. Probabilistic fire risk assessment in buildings using event tree analysis based on UK and USA fire statistics. *Conference : Interflam*. London, UK, 2019. URL: <http://livrepository.liverpool.ac.uk/3142883/2019>
12. Barnett A., Cheng C., Horasan M., He Y., Park L. Fire Load Density Distribution in School Buildings and Statistical Modelling. *Fire Technology*. 2022; 58:503-521. DOI: 10.1007/s10694-021-01150-w
13. Meacham B.J., van Straalen I.J. A socio-technical system framework for risk-informed performance-based building regulation. *Building Research & Information*. 2018; 46(4):444-462. DOI: 10.1080/09613218.2017.1299525
14. Goncharenko V.S., Chechetina T.A., Sibirko V.I., Nadochiy O.V., Polekhin P.V., Kozlov A.A. et al. *Fire and fire safety in 2022 : information and analytical collection*. Balashikha, VNIPO EMERCOM of Russia, 2023; 80. EDN IKFNVG. (rus).
15. Goncharenko V.S., Chechetina T.A., Sibirko V.I., Nadochiy O.V., Polekhin P.V., Kozlov A.A. et al. *Fire and fire safety in 2023 : informational and analytical collection*. Balashikha, VNIPO EMERCOM of Russia, 2024; 110. EDN BSONFO. (rus).
16. Shaimitov A.V. Automated analytical system for support and management of control and supervisory bodies of the Ministry of Emergency Situations of Russia as one of the types of automation of control and supervisory activities of the EMERCOM of Russia. *Young scientist*. 2023; 38(485):233-236. EDN XWFZGI (rus).
17. Porsov D.M., Dunaev D.K., Kharitonov A.B., Kozlov A.A., Enikeev R.Sh., Polekhin P.V. Automated analytical system for support and management of control and supervisory authorities of the Ministry of Emergency Situations of Russia (AAS KND). *Certificate of state registration of a computer program*. RU 2018617462, 02.26.2018. EDN JDJYFQ. (rus).
18. On the commissioning of the information system "Automated analytical system for support and management of control and supervisory bodies of the Ministry of Emergency Situations of Russia" : Order of the Ministry of Emergency Situations of Russia dated March 25, 2022 No. 262. (rus).
19. On approval of the Regulations for work in the information system "Automated analytical system for support and management of control and supervisory bodies of the Ministry of Emergency Situations of Russia" : Order of the Ministry of Emergency Situations of Russia dated 04.10.2022 No. 954. (rus).
20. User's manual for the software tool "Calculator for classifying protected objects into a certain risk category when implementing federal State fire supervision" (calculator). Balashikha, VNIPO EMERCOM of Russia. 2020; 11. URL: <https://mchs.gov.ru/dokumenty/5099> (rus).
21. On the organization of calculations of indicator values for classifying protected objects owned and (or) used (operated) by organizations and citizens into a certain risk category when implementing federal state fire supervision : Order of the Ministry of Emergency Situations of Russia dated December 14, 2020 No. 947. URL: [https://static.mchs.gov.ru/uploads/resource/2020-12-30/federalnyy-gosudarstvennyy-pozharnyy-nadzor\\_1609323335273782784.pdf](https://static.mchs.gov.ru/uploads/resource/2020-12-30/federalnyy-gosudarstvennyy-pozharnyy-nadzor_1609323335273782784.pdf) (rus).
22. SP 2.13130.2020. Systems of fire protection. Fire-resistance security of protecting units. (rus).
23. SP 486.1311500.2020. List of buildings, structures, premises and equipment subject to protection by automatic fire extinguishing systems and fire alarm systems. Fire safety requirements. (rus).
24. SP 7.13130.2013. Heating, ventilation and conditioning. Fire safety requirements. (rus).
25. SP 485.1311500.2020. Automatic fire-extinguishing systems. Designing and regulation.rules. (rus).

*Поступила 10.06.2025, после доработки 10.07.2025;*

*принята к публикации 07.08.2025*

*Received June 10, 2025; Received in revised form July 10, 2025;*

*Accepted August 07, 2025*

### Информация об авторах

**ПОЛЕТАЕВ Александр Николаевич**, к.т.н., ведущий научный сотрудник отдела пожарной безопасности промышленных объектов, технологий и моделирования техногенных аварий, 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: 0009-0009-9210-0706; AuthorID: 774248; e-mail: [poletaev350@mail.ru](mailto:poletaev350@mail.ru)

### Information about the authors

**Alexander N. POLETAEV**, Cand. Sci. (Eng.), Leading Researcher at the Department of Fire Safety of Industrial facilities, Technologies and Modeling of Man-made accidents, 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: 0009-0009-9210-0706; AuthorID: 774248; e-mail: [poletaev350@mail.ru](mailto:poletaev350@mail.ru)

**ГОНЧАРЕНКО Валентина Сергеевна**, научный сотрудник отдела пожарной статистики, 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: 0000-0002-8543-4128; AuthorID: 935519; e-mail: otdel-16@vniipo.ru

**ЖУРАВЛЕВ Юрий Юрьевич**, государственный советник Российской Федерации 3-го класса, начальник нормативно-технического отдела, Департамент надзорной деятельности и профилактической работы МЧС России, Россия, 121357, г. Москва, ул. Ватутина, 1; ORCID: 0000-0001-8017-9642; SPIN-код: 8755-5560; e-mail: Zhur001@mail.ru

**КИРИК Екатерина Сергеевна**, к.ф.-м.н., старший научный сотрудник отдела информационно-телекоммуникационных технологий, Институт вычислительного моделирования Сибирского отделения Российской академии наук, Россия, 660036, г. Красноярск, Академгородок, 50/44; ORCID: 0000-0003-4394-0791; ResearcherID: A-2485-2014; ScopusID: 56867061700; e-mail: kirik@icm.krasn.ru

**НЕСТЕРОВ Михаил Юрьевич**, старший инспектор нормативно-технического отдела, Департамент надзорной деятельности и профилактической работы МЧС России, Россия, 121357, г. Москва, ул. Ватутина, 1; ORCID: 0009-0008-4708-6055; e-mail: nesterov.m01@mail.ru

#### **Вклад авторов:**

**Поletaev A.N.** — идея; сбор материала; обработка материала; написание статьи.

**Гончаренко В.С.** — сбор материала.

**Журавлев Ю.Ю.** — идея; научное редактирование.

**Кирик Е.С.** — идея; научное редактирование.

**Нестеров М.Ю.** — идея; научное редактирование.

*Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.*

**Valentina S. GONCHARENKO**, Researcher at the Department of Fire Statistics, All-Russian Research Institute for Fire Protection of Ministry of Russian Federation for Civil Defense, Emergencies and Elimination of Consequences of Natural Disasters, VNIIPPO, 12, Balashikha, Moscow Region, 143903, Russian Federation; ORCID: 0000-0002-8543-4128; AuthorID: 935519; e-mail: otdel-16@vniipo.ru

**Yuri Yu. ZHURAVLEV**, State Councilor of the Russian Federation, 3rd Class, Head of the Regulatory and Technical Department, Department of Supervision and Preventive Work of the Ministry of Emergency Situations of Russia, Vatutina St., 1, Moscow, 121357, Russian Federation; ORCID: 0000-0001-8017-9642; SPIN-code: 8755-5560; e-mail: Zhur001@mail.ru

**Ekaterina S. KIRIK**, Cand. Phys.-Math. (Eng.), Senior Researcher at the Department of Information and Telecommunication Technologies, Institute of computational modelling Siberian branch of Russian Academic Sciences, Akademgorodok, 50/44, Krasnoyarsk, 660036, Russian Federation; ORCID: 0000-0003-4394-0791; ResearcherID: A-2485-2014; ScopusID: 56867061700; e-mail: kirik@icm.krasn.ru

**Mikhail Yu. NESTEROV**, Senior Inspector of the Regulatory and Technical Department, Department of Supervision and Preventive Work of the Ministry of Emergency Situations of Russia, Vatutina St., 1, Moscow, 121357, Russian Federation; ORCID: 0009-0008-4708-6055; e-mail: nesterov.m01@mail.ru

#### **Contribution of the authors:**

**Poletaev A.N.** — idea; collection of material; processing of material; writing of the article.

**Goncharenko V.S.** — collecting material.

**Zhuravlev Yu.Yu.** — idea; scientific editing.

**Kirik E.S.** — the idea; scientific editing.

**Nesterov M.Yu.** — the idea; scientific editing.

*The authors declare that there is no conflict of interest.*

# Исследование огнезащитных свойств интумесцентных материалов, применяемых на промышленных объектах Арктического региона при ускоренном старении

Екатерина Валерьевна Головина<sup>1</sup>✉, Андрей Владимирович Калач<sup>2,3</sup>,  
Виталий Александрович Скоробогатов<sup>4</sup>

<sup>1</sup> Уральский институт Государственной противопожарной службы Министерства Российской Федерации по делам гражданской обороны, чрезвычайным ситуациям и ликвидации последствий стихийных бедствий, г. Екатеринбург, Россия

<sup>2</sup> Воронежский государственный технический университет (ВГТУ), г. Воронеж, Россия

<sup>3</sup> Воронежский институт Федеральной службы исполнения наказаний, г. Воронеж, Россия

<sup>4</sup> ООО «ТЕРРИТОРИЯ», Московская область, г. о. Красногорск, Россия

## АННОТАЦИЯ

**Введение.** Использование огнезащитных материалов на промышленных объектах, расположенных в Арктическом регионе, требует особого подхода к исследованию сохранения их работоспособности в условиях низких температур и агрессивной окружающей среды. В связи с этим вопрос оценки огнезащитной способности средств огнезащиты представляется востребованным и актуальным.

**Цели и задачи.** Данная работа направлена на исследование сохранности огнезащитных свойств огнезащитного материала под влиянием климатических факторов в условиях открытой промышленной среды. Для осуществления цели исследования были выполнены следующие задачи:

- проведено искусственное старение образцов огнезащитного покрытия в соответствии с применяемыми методиками на 5, 15 и 25 лет;
- исследована устойчивость к влиянию погодных факторов и сохранению огнезащитных характеристик материалов в ходе их использования методами термического анализа;
- проведена оценка огнезащитной эффективности образцов после ускоренного искусственного старения, имитирующего длительную эксплуатацию.

**Методы.** Для осуществления исследования сохранности огнезащитных свойств анализируемых образцов покрытий были применены следующие методы:

- метод искусственного климатического старения;
- методы синхронного термического анализа;
- метод оценки огнезащитной эффективности.

**Результаты.** Результаты испытаний анализируемых образцов огнезащитных материалов при искусственном ускоренном старении показали незначительное ухудшение огнезащитных характеристик покрытия при увеличении количества циклов. Сделан вывод о возможности применения вышеуказанных методов для проведения качественной оценки сохранности огнестойких характеристик исследуемых материалов.

**Выводы.** Проведенные экспериментальные исследования подтверждают, что анализируемые покрытия сохраняют огнезащитную способность при условии соблюдения требований, указанных в технической документации. Следовательно, исследуемый огнезащитный материал интумесцентного типа может быть рекомендован для промышленных объектов, расположенных в регионах с преобладанием низких температур.

**Ключевые слова:** огнезащитные покрытия; огнезащитная эффективность; воздействие климатических факторов; сохранение огнезащитных свойств; вспучивающийся огнезащитный состав; метод термического анализа; объект нефтегазовой отрасли

**Для цитирования:** Головина Е.В., Калач А.В., Скоробогатов В.А. Исследование огнезащитных свойств интумесцентных материалов, применяемых на промышленных объектах Арктического региона при ускоренном старении // Пожаровзрывобезопасность/Fire and Explosion Safety. 2025. Т. 34. № 4. С. 62–72. DOI: 10.22227/0869-7493.2025.34.04.62-72

✉ Головина Екатерина Валерьевна, e-mail: [ekaterinagolovina@yandex.ru](mailto:ekaterinagolovina@yandex.ru)

# Investigation of the flame retardant properties of intumescent materials used at industrial facilities in the Arctic region with accelerated aging

Ekaterina V. Golovina<sup>1</sup>✉, Andrey V. Kalach<sup>2,3</sup>, Vitaly A. Skorobogatov<sup>4</sup>

<sup>1</sup> 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, Yekaterinburg, Russian Federation

<sup>2</sup> Voronezh State Technical University (VSTU), Voronezh, Russian Federation

<sup>3</sup> Voronezh Institute of the Federal Penitentiary Service of Russia, Voronezh, Russian Federation

<sup>4</sup> LLC "TERRITORY", Moscow region, Krasnogorsk, Russian Federation

## ABSTRACT

**Introduction.** The use of fire-resistant materials at industrial facilities located in the Arctic region requires a special approach to the study of their performance in conditions of low temperatures and aggressive environment. In this regard, the issue of assessing the fire-resistant capacity of fire-protection means appears to be in demand and relevant.

**Aims and purposes.** This work is aimed at the study of the preservation of fire-resistant properties of fire-resistant material under the influence of climatic factors in the conditions of an open industrial environment. To achieve the purpose of the study, the following tasks were performed:

- artificial aging of fire-resistant coating specimens was carried out in accordance with the applied methods for 5, 15 and 25 years;
- the resistance to the influence of weather factors and the preservation of fire-resistant characteristics of materials during their use by thermal analysis methods has been investigated;
- the fire-retardant effectiveness of the specimens after accelerated artificial aging, simulating long-term operation, was evaluated.

**Methods.** The following methods were used to study the preservation of the fire-retardant properties of the analyzed coating specimens:

- the method of artificial climatic aging;
- the methods of synchronous thermal analysis;
- the method of assessing fire-retardant effectiveness.

**Results.** The results of testing the analyzed specimens of fire-resistant materials under artificial accelerated aging showed a slight deterioration in the fire-resistant properties of the coating as the number of cycles increased. It was concluded that the above methods can be used to qualitatively assess the preservation of the fire-resistant properties of the studied materials.

**Conclusion.** The conducted experimental studies confirm that the analyzed coatings retain their fire-resistant properties, provided that the requirements specified in the technical documentation are met. Therefore, the studied intumescent fire-resistant material can be recommended for industrial facilities located in regions with predominantly low temperatures.

**Keywords:** flame-retardant coatings; flame-retardant effectiveness; impact of climatic factors; preservation of flame-retardant properties; bulging flame retardant; thermal analysis method; oil and gas industry facility

**For citation:** Golovina E.V., Kalach A.V., Skorobogatov V.A. Investigation of the flame retardant properties of intumescent materials used at industrial facilities in the Arctic region with accelerated aging. *Pozharovzryvobezopasnost'/Fire and Explosion Safety*. 2025; 34(4):62-72. DOI: 10.22227/0869-7493.2025.34.04.62-72 (rus).

✉ Ekaterina Valeryevna Golovina, e-mail: ekaterinagolovina@yandex.ru

## Введение

В связи с необходимостью разработки и освоения новых месторождений нефти и газа наблюдается возрастание интереса к развитию промышленных объектов, расположенных в Арктическом регионе. Развитие предприятий нефтегазового комплекса диктует соблюдение требований пожарной безопасности, в том числе посредством применения специальных средств огнезащиты. В то же время необходимо принимать во внимание специфику эксплуатации данных промышленных объектов, поскольку арктический климат обладает рядом кли-

матических особенностей, оказывающих влияние на выбор и осуществление огнезащиты конкретного объекта.

Необходимо выделить следующие параметры, влияющие на выбор огнезащитного покрытия для предприятий нефтегазовой отрасли, расположенных в Арктическом регионе:

- условия эксплуатации, такие как температурно-влажностные условия эксплуатации и производства работ по огнезащите [1], способность к сохранению огнезащитных свойств в диапазоне температур, характерных для Арктической зоны (от  $-50\text{ }^{\circ}\text{C}$  до  $-75\text{ }^{\circ}\text{C}$ ) [2, 3];

- стойкость к агрессивности окружающей среды, возможность для применения огнезащитного материала для внешних работ [4];
- сохранение прочности и адгезионных свойств покрытия при длительной эксплуатации в условиях арктических климатических условий [4, 5].

Арктический регион представляет собой уникальную экологическую систему с особыми климатическими условиями, что предъявляет особые требования к эксплуатационным характеристикам строительных материалов, в том числе и к огнезащитным. В условиях Арктики особое внимание необходимо уделять выбору материалов, учитывая не только их огнезащитные свойства, но и стойкость к низким температурам и воздействию агрессивных факторов окружающей среды. В работах [6–9] приведены результаты исследования огнезащитных свойств терморасширяющихся материалов для стальных конструкций. Авторы сходятся во мнении, что оценка огнезащитной эффективности выступает одним из методов, с помощью которых определяются основные параметры качества обеспечения пожарной безопасности защищаемого объекта. Учитывая сложность эксплуатационных условий промышленных предприятий, расположенных в Арктическом регионе, одним из факторов, влияющих на сохранение огнезащитных функций покрытия, является срок службы в условиях длительного времени и действия неблагоприятных климатических условий арктических районов [10, 11].

Исследователями [12, 13] предлагается применение огнезащитных материалов интумесцентного типа для объектов нефтегазовой отрасли. К основным достоинствам вспучивающихся составов относится возможность нанесения малыми толщинами [14], не требуется сложное техническое оборудование для нанесения на защищаемую конструкцию и возможность применения к конструкциям практически любой сложности [15, 16].

Одновременно с этим при внешней целостности проблемным вопросом является обеспечение сохранения огнезащитных свойств покрытия [17].

Наиболее проблематичным является определение момента, когда покрытие утрачивает свои защитные функции и подлежит замене [18]. Данный аспект представляет значительный интерес с точки зрения обеспечения пожарной безопасности, поскольку от него зависит эффективность защиты объектов от пожара [19].

Целью данной работы является исследование сохранности огнезащитных свойств огнезащитного материала при воздействии климатических факторов в условиях открытой промышленной среды.

Для достижения поставленной цели исследования было проведено искусственное старение об-

разцов огнезащитного покрытия в соответствии с применяемыми методиками на 5, 15 и 25 лет; исследована устойчивость к влиянию погодных факторов и сохранению огнезащитных характеристик материалов в ходе их использования методами термического анализа; проведена оценка огнезащитной эффективности образцов после ускоренного искусственного старения, имитирующего длительную эксплуатацию.

В настоящем исследовании приводятся результаты испытаний на сохранность огнезащитных характеристик при климатическом старении в условиях открытой промышленной атмосферы (ХЛ1, УХЛ1 по ГОСТ 15150–69<sup>1</sup>) на примере современного огнезащитного покрытия, применяемого для объектов нефтегазового комплекса.

### Материалы и методы

С 1 октября 2024 г. начал действовать национальный стандарт Российской Федерации ГОСТ Р 71618–2024 «Конструкции стальные строительные с огнезащитными покрытиями. Методы испытаний антикоррозионных свойств и стойкости к воздействию климатических факторов в процессе эксплуатации»<sup>2</sup>. Данный документ можно применять в качестве руководства при установлении гарантийного срока для огнезащитных покрытий, применяемых на стальных элементах строительных конструкций [20, 21].

В качестве объекта исследования было выбрано атмосферостойкое огнезащитное покрытие интумесцентного типа (далее — ОЗП) на органической основе, характеристики которого, согласно технической документации, соответствуют специфике промышленных объектов, расположенных в арктических районах. Покрытия наносились по схеме в соответствии с технической документацией:

- грунтовочный слой толщиной сухого слоя не менее 0,80 мкм;
- атмосферостойкое огнезащитное покрытие толщиной сухого слоя не менее 0,870 мкм;
- финишное покрытие толщиной сухого слоя не менее 0,50 мкм.

Испытания проводились посредством нанесения покрытия на четырех образцах стальных пластин при температуре –10... –15 °С, один из которых использовался в качестве контрольного и не подвергался воздействию ускоренных климатических испытаний.

<sup>1</sup> ГОСТ 15150–69. Машины, приборы и другие технические изделия. Исполнения для различных климатических районов. Категории, условия эксплуатации, хранения и транспортирования в части воздействия климатических факторов внешней среды.

<sup>2</sup> ГОСТ Р 71618–2024. Конструкции стальные строительные с огнезащитными покрытиями. Методы испытаний антикоррозионных свойств и стойкости к воздействию климатических факторов в процессе эксплуатации.

**Таблица 1.** Оборудование и параметры проведения испытаний  
**Table 1.** Equipment and test parameters

| Оборудование<br>Equipment   | Параметры испытаний<br>Test parameters |  | Время выдержки образцов в одном цикле, ч<br>Specimen holding time in one cycle, h |
|---|--|--|---|
|   | Температура, °C<br>Temperature, °C     | Относительная влажность, %<br>Relative humidity, % |   |
| Камера климатическая ТН-225 С<br>Climate control chamber TN-225 C   | +40 (± 2)                              | +97 (+ 3)  | 2   |
| Испытательная камера с напуском сернистого газа SO <sub>2</sub> LRHS-297-RSO <sub>2</sub> (концентрация SO <sub>2</sub> (5 + 1) мг/м <sup>3</sup> )<br>Test chamber with SO <sub>2</sub> sulfur dioxide intake RHS-297-RSO <sub>2</sub> (concentration of SO <sub>2</sub> (5 + 1) mg/m <sup>3</sup> ) | +40 (± 2)                              | +97 (+ 3)  | 2   |
| Камера климатическая ТН-225 С<br>Climate control chamber TN-225 C   | –30 (± 3)                              | Не нормируется<br>It is not standardized           | 6   |
| УФ-камера для испытаний на атмосферостойкость UV-ST-260:<br>режим 3 мин орошения, 17 мин без орошения<br>UV weather resistance test chamber UV-ST-260:<br>3 minutes irrigation mode, 17 minutes without irrigation  | +60 (± 3)                              | Не нормируется<br>It is not standardized           | 5   |
| Камера климатическая ТН-225 С<br>Climate control chamber TN-225 C   | –60 (± 3)                              | Не нормируется<br>It is not standardized           | 3   |
| Выдержка на воздухе<br>Exposure to air  | 15–30                                  | Не более 80<br>No more than 80                     | 6   |
| Итого<br>Total  | 24                                     |  |   |

В рамках исследования циклическое искусственное старение трех образцов осуществлялось в соответствии с ГОСТ 9.401–2018<sup>3</sup>, по методу 6. Далее проводилось определение стойкости огнезащитных покрытий к воздействию климатических факторов и сохранности огнезащитных свойств в процессе эксплуатации. Для оценки огнезащитной эффективности использовались два метода: термический анализ (ГОСТ Р 53293–99<sup>4</sup>) и метод оценки огнезащитной эффективности (ГОСТ Р 53295–2009<sup>5</sup>).

Искусственное старение имитировало эксплуатацию огнезащитного терморасширяющегося покрытия в течение 5, 15 и 25 лет. Режим испытаний, порядок перемещения и продолжительность выдержки образцов в установках приведены в табл. 1.

Далее проводился визуальный осмотр покрытия. В соответствии с требованиями ГОСТ 9.407–2015<sup>6</sup>

допускаются внешние повреждения не более 15 % поверхности образца покрытия, площадь коррозионного разрушения — не более 1 %.

В соответствии с ГОСТ Р 53293–99<sup>4</sup> методами термического анализа проводилось определение сохранности огнезащитных свойств исследуемых образцов покрытий. Для каждого образца проводились не менее трех параллельных испытаний.

Методами термического анализа испытывались образцы покрытия, нанесенного на стальные пластины, подвергнутые искусственному старению. Соответственно, ТА проводился для всего огнезащитного материала, нанесенного на пластину, включая финишное покрытие.

Оценка огнезащитной эффективности производилась в соответствии с методикой, указанной в ГОСТ Р 53295–2009<sup>5</sup>. Среднюю температуру металла рассчитывали как среднее значение показаний термпар, установленных на образце.

### Результаты и их обсуждение

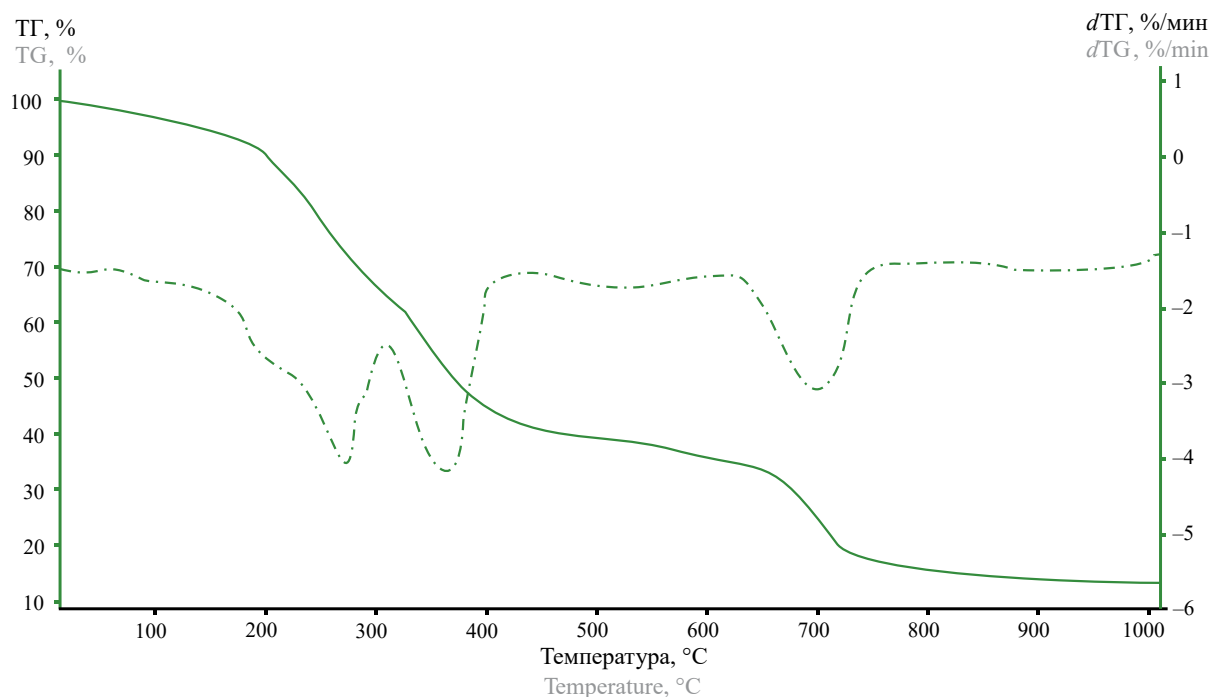
Как известно, анализ термоаналитических кривых позволяет выявить не только термические свойства интумесцентных материалов, но и обеспечивает полное понимание термостойкости и устойчивости исследуемых образцов к воздействию высоких температур.

<sup>3</sup> 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.

<sup>4</sup> ГОСТ Р 53293–99. Пожарная опасность веществ и материалов. Материалы, вещества и средства огнезащиты. Идентификация методами термического анализа.

<sup>5</sup> ГОСТ Р 53295–2009. Средства огнезащиты для стальных конструкций. Общие требования. Метод определения огнезащитной эффективности.

<sup>6</sup> ГОСТ 9.407–2015. Единая система защиты от коррозии и старения. Покрытия лакокрасочные. Метод оценки внешнего вида.



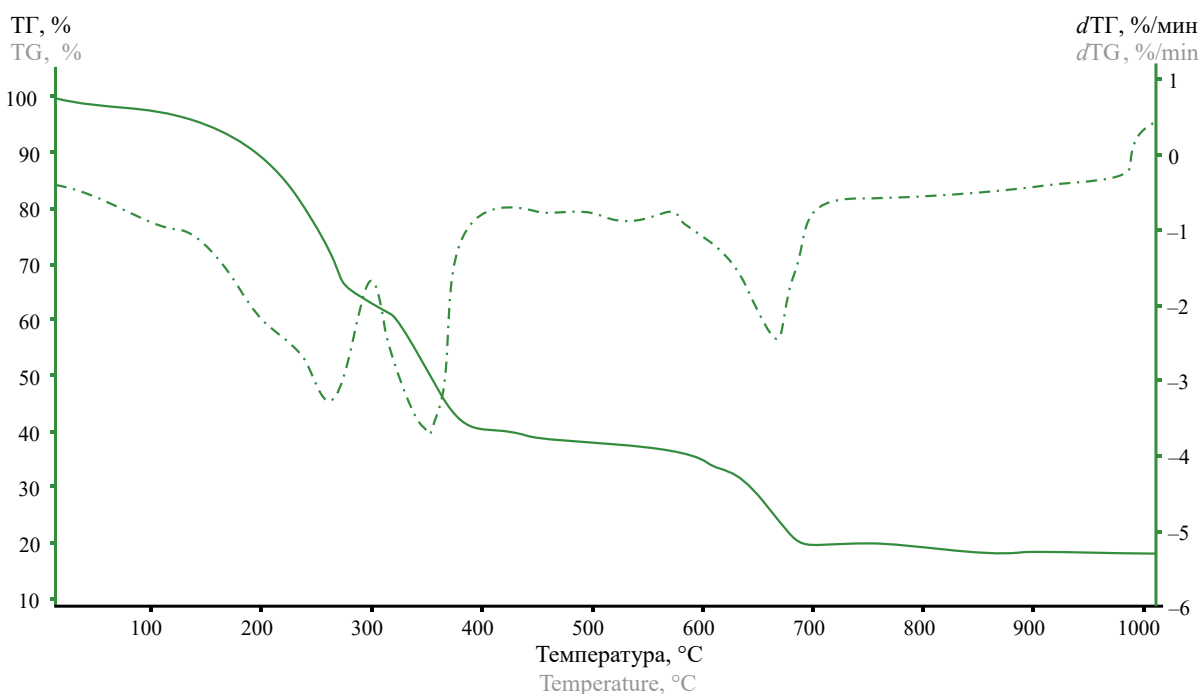
**Рис. 1.** Результаты термического анализа контрольного образца (без старения)  
**Fig. 1.** Results of thermal analysis of the control specimen (without aging)

Установлены незначительные изменения внешнего вида покрытия в зависимости от длительности климатических испытаний.

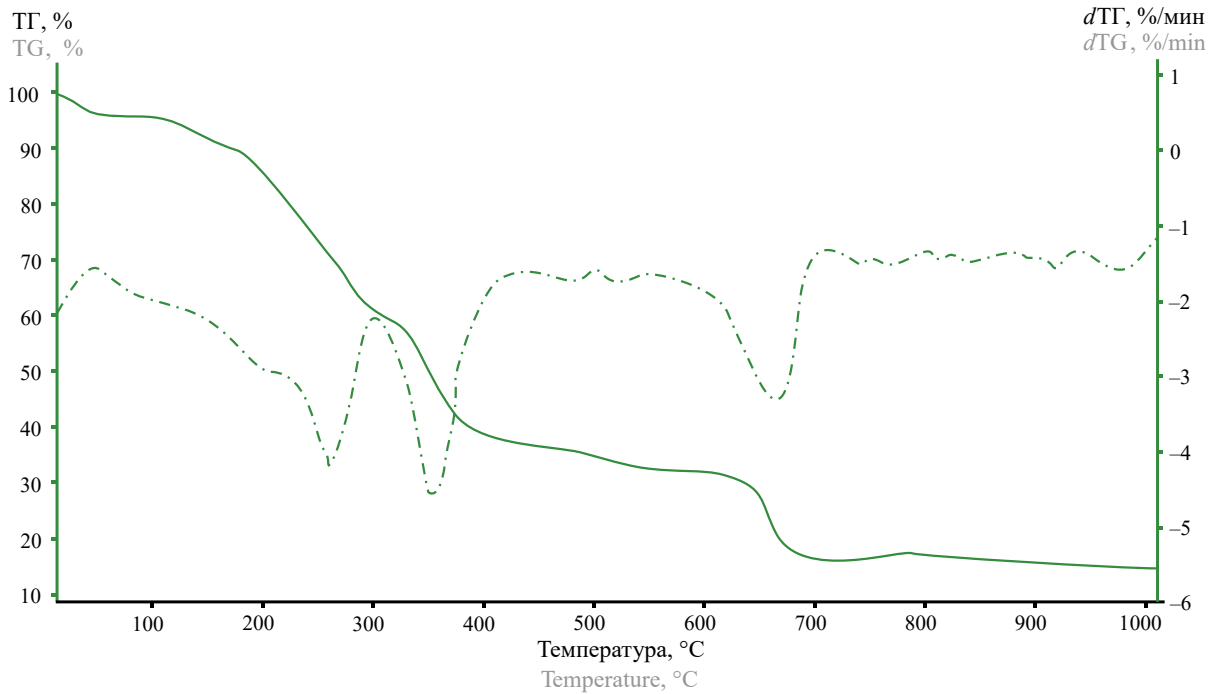
Необходимо также отметить, что при исследовании наблюдали слабое посветление образца после 224 циклов старения.

Термоаналитические кривые исследуемых образцов представлены на рис. 1–4.

Исходя из данных термограммы контрольного образца, представленной на рис. 1, на ТГ-кривой прослеживается 3 основных этапа потери массы, что согласовывается с данными ДТГ-кривой.



**Рис. 2.** Результаты термического анализа образца после 45 циклов старения  
**Fig. 2.** Results of thermal analysis of the specimen after 45 aging cycles

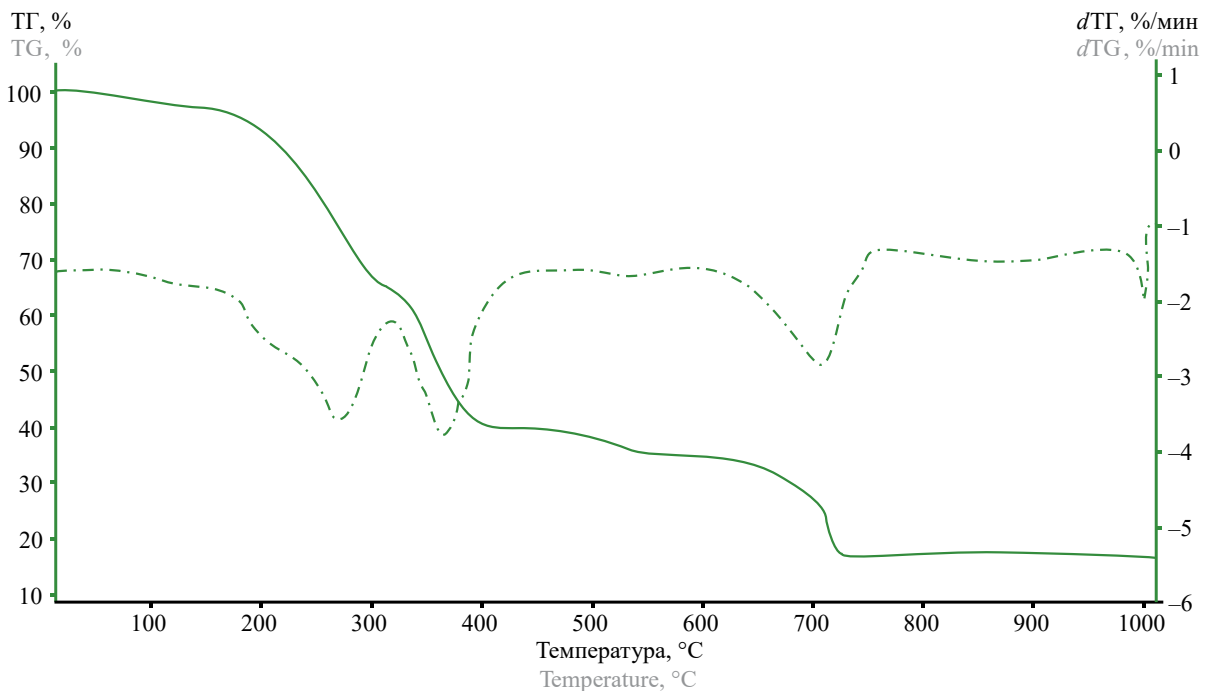


**Рис. 3.** Результаты термического анализа образца после 134 циклов старения  
**Fig. 3.** Results of thermal analysis of the specimen after 134 aging cycles

Основные этапы потери массы наблюдаются в интервалах температур 200–400 °С, 300–500 °С, 500–700 °С. Зольный остаток составил 15,44 %.

Полученные результаты исследования образцов, подвергшихся искусственному старению (см. рис. 2–4), хорошо согласовываются с ТГ и ДСК кри-

выми исходного образца без старения. Потеря массы выражена тремя основными пиками в интервалах температур 200–400 °С, 300–500 °С, 500–700 °С. Зольный остаток для всех состаренных образцов варьируется в пределах от 15,26 до 17,8 %, что отличается от значения для контрольного образца не более чем на 2,5 %.



**Рис. 4.** Результаты термического анализа образца после 224 циклов старения  
**Fig. 4.** Results of thermal analysis of the specimen after 224 aging cycles

**Таблица 2.** Результаты термического анализа образцов покрытия  
**Table 2.** Results of thermal analysis of coating specimens

| Термоаналитическая характеристика<br>hermoanalytical characteristics   | Без старения<br>Without aging | 45 циклов<br>старения<br>45 aging cycles | 134 цикла<br>старения<br>134 aging cycles | 224 цикла<br>старения<br>224 aging cycles |
|--|-------------------------------|--|---|---|
| <i>Потеря массы <math>\Delta m</math>, %, при температуре, °C</i><br><i>Mass loss <math>\Delta m</math>, %, at temperature, °C</i>   |                               |  |   |   |
| $\Delta m_{200}$   | 5,41                          | 6,47                                     | 6,35                                      | 4,35                                      |
| $\Delta m_{300}$   | 21,44                         | 22,59                                    | 22,64                                     | 20,48                                     |
| $\Delta m_{400}$   | 36,31                         | 36,88                                    | 37,58                                     | 35,55                                     |
| $\Delta m_{500}$   | 38,73                         | 39,11                                    | 40,23                                     | 37,76                                     |
| Зольный остаток, % (1000 °C)<br>Ash residue, % (1,000 °C)  | 15,44                         | 15,26                                    | 17,35                                     | 17,80                                     |
| <i>Температура, °C, при потере массы</i><br><i>Temperature, °C, with weight loss</i>   |                               |  |   |   |
| $T_{5\%}$  | 189,65                        | 171,33                                   | 165,65                                    | 200,13                                    |
| $T_{10\%}$   | 234,65                        | 226,33                                   | 225,65                                    | 240,13                                    |
| $T_{20\%}$   | 284,65                        | 276,33                                   | 280,65                                    | 290,13                                    |
| $T_{30\%}$   | 359,65                        | 356,33                                   | 360,65                                    | 265,13                                    |
| $T_{50\%}$   | 704,65                        | 686,33                                   | 690,65                                    | 720,13                                    |
| <i>Характеристика максимумов ДТГ-пиков в температурном интервале</i><br><i>(температура максимума <math>T_{max}</math>/максимальная скорость потери массы <math>A_{max}</math>, %/мин)</i><br><i>Characteristics of the maxima of DTG peaks in the temperature range</i><br><i>(maximum temperature <math>T_{max}</math>/maximum mass loss rate <math>A_{max}</math>, %/min)</i> |                               |  |   |   |
| 200–400 °C   | 271,80/2,39                   | 264,66/2,18                              | 272,08/2,34                               | 270,49/2,24                               |
| 300–500 °C   | 361,92/2,58                   | 358,17/2,36                              | 366,80/2,74                               | 326,86/2,56                               |
| 500–700 °C   | 691,21/1,55                   | 679,72/1,59                              | 684,73/1,62                               | 709,00/1,54                               |

По результатам термического анализа в соответствии с ГОСТ Р 53293–99<sup>4</sup> были определены значимые идентификационные характеристики по ДТГ-и ТГ-кривым (табл. 2).

Установление идентичности образцов проводилось в результате сравнения методами статистического анализа идентификационных характеристик испытуемого образца с аналогичными характеристиками, полученными для идентификатора.

В результате анализа идентификационных характеристик выделено четыре основных температурных интервала потери массы контрольного образца огнезащитной композиции без старения: при температурах 200, 300, 400 и 500 °C. Анализ ДТГ-кривой свидетельствует о наличии трех максимумов температур, соответствующих максимальной скорости потери массы. Последний этап потери массы достигает своего максимума при температуре 691,21 °C и обусловлен процессом горения пенококсового слоя.

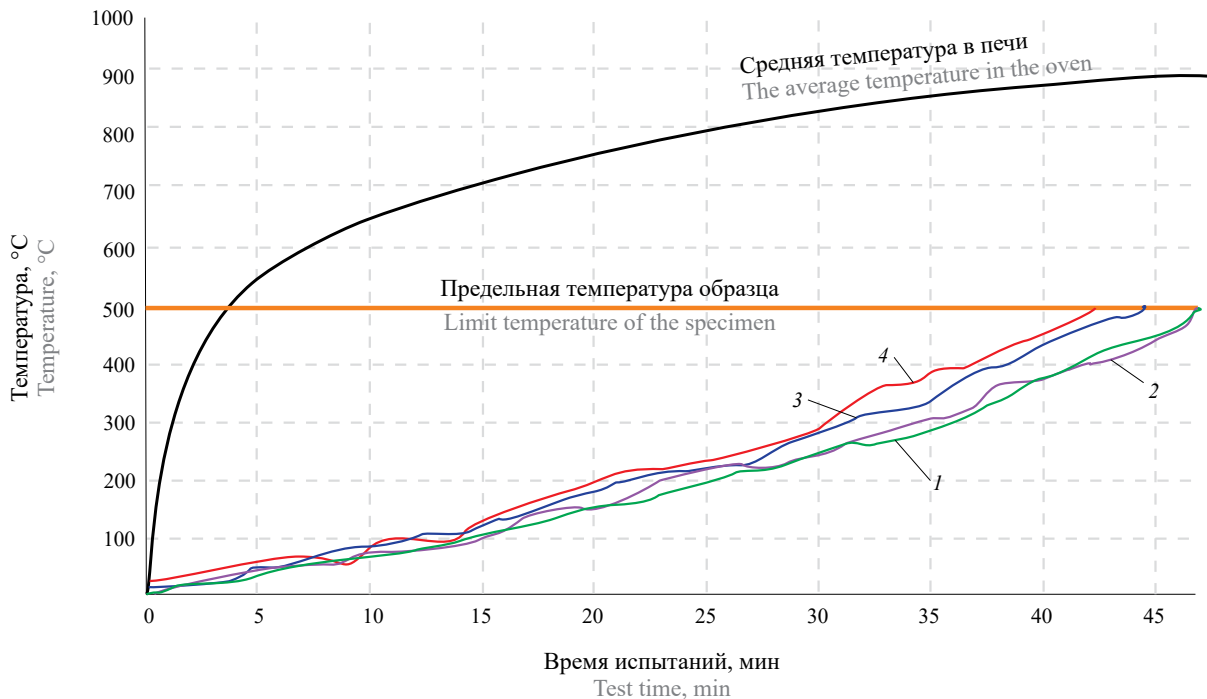
Анализ идентификационных характеристик образцов, подвергшихся искусственному старению (табл. 2),

выявил соответствие с основными температурными интервалами потери массы контрольного образца при температурах 200, 300, 400 и 500 °C. Отклонение значений потери массы в анализируемых интервалах температур состаренных образцов от контрольного составляет: после 45 циклов старения — 1,7 %, после 134 циклов старения — 0,9 %, после 224 циклов старения — 2,5 %.

Таким образом, экспериментально установлена схожесть ТГ- и ДТГ-кривых в температурном интервале исследования, одновременно с этим сопоставление значимых идентификационных характеристик, полученных методом термического анализа, с теоретически рассчитанными статистическими критериями не выявило значительных отклонений.

Зависимости изменения температуры в печи и на образцах при испытаниях по ГОСТ Р 53295–2009<sup>5</sup> представлены на рис. 5.

По результатам испытаний установлено, что время достижения критической температуры 500 °C на образцах составило: контрольный без старения —



**Рис. 5.** Оценка огнезащитной эффективности: 1 — контрольный образец без старения; 2 — после 45 циклов старения; 3 — после 134 циклов старения; 4 — после 224 циклов старения

**Fig. 5.** Assessment of flame retardant effectiveness: 1 — control specimen without aging; 2 — after 45 aging cycles; 3 — after 134 aging cycles; 4 — after 224 aging cycles

48 мин; после 45 циклов старения — 47 мин; после 134 циклов старения — 44 мин; после 224 циклов старения — 41 мин.

### Выводы

В результате исследований огнезащитного покрытия интумесцентного типа на основе органического связующего были проведены климатические испытания на образцах, подвергшихся искусственному старению на 5, 15 и 25 лет.

Методом термического анализа были определены значимые термоаналитические характеристики и произведена обработка графических зависимостей в соответствии с ГОСТ Р 53293–99<sup>4</sup>. Установлено, что на основании совпадения количества основных ДТГ-максимумов и тождественности термоаналитических кривых во всем температурном интервале сравнения можно сделать вывод об идентичности анализируемых образцов.

Исследование методом оценки огнезащитной эффективности подтверждает, что при продолжи-

тельной эксплуатации в условиях воздействия климатических факторов анализируемые огнезащитные материалы снижают свои защитные свойства несущественно, отклонение значения от контрольного образца при 224 циклах составило менее 10 %, что соответствует прогнозной огнезащитной эффективности в течение 25 лет эксплуатации.

Таким образом, исследование показало, что атмосферостойкое огнезащитное терморасширяющееся покрытие, нанесенное в соответствии со всеми требованиями технологического процесса, способно сохранять свою эффективность в условиях открытой промышленной атмосферы (ХЛ1, УХЛ1) не менее 25 лет.

Установлено, что испытываемые ОЗП на основе органического связующего продемонстрировали высокие огнезащитные свойства и надежность в экстремальных условиях, что удовлетворяет требованиям, необходимым для огнезащиты и долгосрочной эксплуатации объектов в Арктическом регионе.

### СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. *Gravit M., Shabunina D.* Structural Fire Protection of Steel Structures in Arctic Conditions // Buildings. 2021. Vol. 11 (11). P. 499. DOI: 10.3390/buildings11110499. EDN VTEVLC.
2. *Захарова М.И.* Анализ и оценка риска аварий резервуаров и газопроводов при низких температурах : автореф. дис. ... канд. техн. наук. Уфа : Уфим. гос. нефтяной техн. ун-т., 2015. 22 с. EDN ZPPZER.

3. *Спирidonov A.A., Фадеев A.M.* Современные технологии при реализации нефтегазовых проектов в Арктике // Арктика 2035: актуальные вопросы, проблемы, решения. 2022. № 2 (10). С. 25–31. DOI: 10.51823/74670\_2022\_2\_25. EDN ZJVOQA.
4. *Калач A.B., Головина E.B., Клементьев B.A.* Обзор вариантов обеспечения огнезащиты стальных конструкций объектов нефтегазового комплекса в условиях Арктического региона // Пожаротушение: проблемы, технологии, инновации : мат. VIII Междунар. науч.-практ. конф., в 2 ч., Москва, 17–18 марта 2022 года. Ч. 1. М. : Академия Государственной противопожарной службы Министерства Российской Федерации по делам гражданской обороны, чрезвычайным ситуациям и ликвидации последствий стихийных бедствий, 2022. С. 317–320. EDN AUXBUS.
5. *Зыбина O.A., Устинов A.A., Бабикова A.C.* Совершенствование методов оценки огнезащитной эффективности интумесцентных покрытий для защиты металлоконструкций // Огнезащита материалов и конструкций Spbru FPM-2023 : сб. тезисов докладов I Междунар. науч.-практ. конф. Санкт-Петербург, 2023. С. 192–195. EDN GJGKFR.
6. *Головина E.B., Калач A.B.* Исследование огнезащитных свойств терморасширяющихся материалов для использования в климатических условиях Арктической зоны // Пожаровзрывобезопасность/Fire and Explosion Safety. 2023. № 6 (32). С. 5–12. DOI: 10.22227/0869-7493.2023.32.06.5-12
7. *Пехотиков A.B. и др.* Актуальные вопросы применения средств огнезащиты для стальных конструкций // Евростройпрофи. 2015. № 79. С. 34–38.
8. *Комарова M.A., Гришин И.А., Шалабин M.B., Мельников H.O.* Разработка методов испытаний огнезащитных покрытий стальных строительных конструкций в процессе эксплуатации // Вестник НИЦ Строительство. 2024. № 1 (40). С. 21–34. DOI: 10.37538/2224-9494-2024-1(40)-21-34. EDN CJYXWA.
9. *Eremina T., Korolchenko D.* Fire Protection of Building Constructions with the Use of Fire-Retardant Intumescent Compositions // Buildings. 2020. No. 10 (10). P. 185. DOI: 10.3390/buildings10100185. EDN JBSWFO.
10. *Докучаева Л.В., Старостенков A.C., Мельников H.O.* Исследование процессов ускоренного старения огнезащитных покрытий // Успехи химии и химической технологии. 2012. Т. 26. № 2 (131). С. 99–104. EDN RCCFNP.
11. *Mohd Sabee M.M.S., Itam Z., Beddu S., Zahari N.M., Mohd Kamal N.L., Mohamad D. et al.* Flame Retardant Coatings: Additives, Binders, and Fillers // Polymers (Basel). 2022. No. 14 (14). P. 2911. DOI: 10.3390/polym14142911
12. *Eremina T.Yu., Minaylov D.A., Klochkov Yu.S., Cahyadi B., Zybina O.A., Turkov V.A.* Features of numerical simulation of a steel building structure heating with fire protection by intumescent coating // Proceedings on Engineering Sciences. 2024. Vol. 6. No. 3. Pp. 1077–1086. DOI: 10.24874/pes06.03.021. EDN YDWEUO.
13. *Lucherini A., Giuliani L., Jomaas G.* Experimental study of the performance of intumescent coatings exposed to standard and non-standard fire conditions // Fire Safety Journal. 2018. No. 95. Pp. 42–50. DOI: 10.1016/j.firesaf.2017.10.004
14. *Siddiqui A.A., Ewer J.A., Lawrence P.J., Galea E.R., Frost I.R.* Building Information Modelling for performance-based Fire Safety Engineering analysis : A strategy for data sharing // Journal of Building Engineering. 2021. Vol. 42 (3). P. 102794. DOI: 10.1016/j.jobee.2021.102794
15. *Еремина Т.Ю., Уткин С.В.* Исследование изменений свойств огнезащитных покрытий интумесцентного типа методом термомеханического анализа // Пожаровзрывобезопасность/Fire and Explosion Safety. 2024. № 2 (33). С. 32–41. DOI: 10.22227/0869-7493.2024.33.02.32-41. EDN MHQLEL.
16. *Weil E.D.* Fire-protective and flame-retardant coating // Journal of fire sciences. 2011. No. 29 (3). Pp. 259–296. DOI: 10.1177/0734904110395469
17. *Головина E.B., Беззапонная O.B., Мансуров Т.Х.* Влияние агрессивной среды на термостойкость и горючесть интумесцентного состава на основе силиконового связующего // Техносферная безопасность. 2017. № 4 (17). С. 44–50. EDN XIDHLM.
18. *Kalafat K., Taran N., Vakhitova L., Plavan V., Bessarabov V., Zagoriy G.* Comparison of fire resistance of polymers in intumescent coatings for steel structures // Eastern-European Journal of Enterprise Technologies. 2020. No. 10-106 (4). Pp. 45–54. DOI: 10.15587/1729-4061.2020.209841. EDN EBOYFE.
19. *Комарова M.A., Мельников H.O., Шалабин M.B., Скоробогатов B.A., Головина E.B.* Огнезащитная эффективность покрытий металлических конструкций при ускоренном климатическом старении // Техносферная безопасность. 2024. № 4 (45). С. 3–22. EDN NBZDZG.
20. *Cirpici B.K., Wang Y.C., Rogers B.D.* An analytical approach for predicting expansion of intumescent coating with different heating conditions : Proceedings of the 12th International Congress on Advances in Civil Engineering. Turkey, 2016. Pp. 1–8. URL: [https://www.researchgate.net/publication/308793883\\_An\\_Analytical\\_Approach\\_for\\_Predicting\\_Expansion\\_of\\_Intumescent\\_Coating\\_with\\_Different\\_Heating\\_Conditions](https://www.researchgate.net/publication/308793883_An_Analytical_Approach_for_Predicting_Expansion_of_Intumescent_Coating_with_Different_Heating_Conditions)
21. *Шмакова O.A.* Способы исследования эффективности огнезащитных покрытий металлоконструкций в условиях эксплуатации с течением времени // Гражданская оборона на страже мира и безопасности : мат. V Междунар. науч.-практ. конф., посвящ. Всемирному дню гражданской обороны. М., 2021. С. 72–79. EDN AVDSAZ.

## REFERENCES

1. Gravit M., Shabunina D. Structural Fire Protection of Steel Structures in Arctic Conditions. *Buildings*. 2021; 11(11):499. DOI: 10.3390/buildings11110499. EDN VTEVLC.
2. Zakharova M.I. Analysis and assessment of the risk of accidents of tanks and gas pipelines at low temperatures : *abstract of dissertation of Candidate of technical sciences*. Ufa, Ufa State Petroleum Engineering university, 2015; 22. EDN ZPPZEP. (rus).
3. Spiridonov A.A., Fadeev A.M. Modern technologies in the implementation of oil and gas projects in the Arctic. *Arctic 2035: current issues, problems, solutions*. 2022; 2(10):25-31. DOI: 10.51823/74670\_2022\_2\_25. EDN ZJVOQA. (rus).
4. Kalach A.V., Golovina E.V., Klementyev B.A. Review of options for ensuring fire protection of steel structures of oil and gas facilities in the Arctic region. Firefighting: problems, technologies, innovations : *Proceedings of the VIII International Scientific and Practical Conference. Part I*. Moscow, Academy of the State Fire Service of the Ministry of the Russian Federation for Civil Defense, Emergencies and Elimination of Consequences of Natural Disasters. 2022; 317-320. EDN AUXBUS. (rus).
5. Zybina O.A., Ustinov A.A., Babikova A.S. Improving methods for assessing the fire protection efficiency of intumescent coatings for protecting metal structures. Fire protection of materials and structures Spbpu FPM-2023 : *collection of abstracts of reports of the I International Scientific and Practical Conference*. St. Petersburg, 2023; 192-195. EDN GJGKFR. (rus).
6. Golovina E.V., Kalach A.V. Study of flame-retardant properties of thermally expanding materials for use in the climatic conditions of the Arctic zone. *Pozharovzryvobezопасnost/Fire and explosion safety*. 2023; 32(6):5-12. DOI: 10.22227/0869-7493.2023.32.06.5-12 (rus).
7. Pekhotikov A.V. et al. Current issues of application of fire protection means for steel structures. *Eurostroyprofi*. 2015; 79:34-38. (rus).
8. Komarova M.A., Grishin I.A., Shalabin M.V., Melnikov N.O. Development of test methods for fire-resistant coatings of steel building structures during operation. *Bulletin of Science and Research Center of Construction*. 2024; 1(40):21-34. DOI: 10.37538/2224-9494-2024-1(40)-21-34. EDN CJYXWA. (rus).
9. Eremina T., Korolchenko D. Fire protection of building constructions with the use of fire-retardant intumescent compositions. *Buildings*. 2020; 10:185. DOI: 10.3390/buildings10100185. EDN JBSWFO.
10. Dokuchaeva L.V., Starostenkov A.S., Melnikov N.O. Study of accelerated aging processes of fire-protective coatings. *Advances in chemistry and chemical technology*. 2012; 26:2(131):99-104. EDN RCCFNP. (rus).
11. Mohd Sabee M.M.S., Itam Z., Beddu S., Zahari N.M., Mohd Kamal N.L., Mohamad D. et al. Flame retardant coatings: additives, binders, and fillers. *Polymers (Basel)*. 2022; 14. DOI: 10.3390/polym14142911
12. Eremina T.Yu., Minaylov D.A., Klochkov Yu.S., Cahyadi B., Zybina O.A., Turkov V.A. Features of numerical simulation of a steel building structure heating with fire protection by intumescent coating. *Proceedings on Engineering Sciences*. 2024; 6(3):1077-1086. DOI: 10.24874/pes06.03.021. EDN YDWEUO.
13. Lucherini A., Giuliani L., Jomaas G. Experimental study of the performance of intumescent coatings exposed to standard and non-standard fire conditions. *Fire Safety Journal*. 2018; 95:42-50. DOI: 10.1016/j.firesaf.2017.10.004
14. Siddiqui A.A., Ewer J.A., Lawrence P.J., Galea E.R., Frost I.R. Building Information Modelling for performance-based Fire Safety Engineering analysis : A strategy for data sharing. *Journal of Building Engineering*. 2021; 42:102794. DOI: 10.1016/j.jobe.2021.102794
15. Eremina T.Yu., Utkin S.V. Study of changes in the properties of fire-retardant coatings of intumescent type by thermomechanical analysis method. *Pozharovzryvobezопасnost/Fire and Explosion Safety*. 2024; 33(2):32-41. DOI: 10.22227/0869-7493.2024.33.02.32-41. EDN MHQLEL. (rus).
16. Weil E.D. Fire-protective and flame-retardant coating. *Journal of fire sciences*. 2011; 29:259-296. DOI: 10.1177/07349041110395469
17. Golovina E.V., Bezzaponnaya O.V., Mansurov T.H. The influence of the aggressive environment on the thermal stability and flammability of intumescent silicone composition. *Technosphere safety*. 2017; 4(17):44-50. EDN XIDHLM. (rus).
18. Kalafat K., Taran N., Plavan V., Bessarabov V., Zagoriy G., Vakhitova L. Comparison of fire resistance of polymers in intumescent coatings for steel structures. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*. 2020; 4(10-106):45-54. DOI: 10.15587/1729-4061.2020.209841. EDN EBOYFE.
19. Komarova M.A., Melnikov N.O., Shalabin M.V., Skorobogatov V.A., Golovina E.V. Fire-resistant effectiveness of coatings of metal structures under accelerated climatic aging. *Technosphere safety*. 2024; 4(45):3-22. EDN NBZDZG (rus).
20. Cirpici K.B., Wang Y.C., Rogers B.D. An analytical approach for predicting expansion of intumescent coating with different heating conditions : *Proceedings of the 12th International Congress on Advances in Civil Engineering*. Turkey, 2016; 1-8. URL: [https://www.researchgate.net/publication/308793883\\_An\\_Analytical\\_Approach\\_for\\_Predicting\\_Expansion\\_of\\_Intumescent\\_Coating\\_with\\_Different\\_Heating\\_Conditions](https://www.researchgate.net/publication/308793883_An_Analytical_Approach_for_Predicting_Expansion_of_Intumescent_Coating_with_Different_Heating_Conditions)

21. Shmakova O.A. Methods for studying the effectiveness of fire-resistant coatings of metal structures in operating conditions over time. Civil defense on guard of peace and security : *mat. V International Scientific-practical Conference, dedicated to the World Civil Defense Day*. Moscow, 2021; 72-79. EDN AVDSAZ. (rus).

*Поступила 27.01.2025, после доработки 15.07.2025;*

*принята к публикации 16.07.2025*

*Received January 27, 2025; Received in revised form July 15, 2025;*

*Accepted July 16, 2025*

### Информация об авторах

**ГОЛОВИНА Екатерина Валерьевна**, к.т.н., старший научный сотрудник, Уральский институт Государственной противопожарной службы Министерства Российской Федерации по делам гражданской обороны, чрезвычайным ситуациям и ликвидации последствий стихийных бедствий, Россия, 620062, Свердловская обл., г. Екатеринбург, ул. Мира, 22; РИНЦ ID: 846886; ORCID: 0000-0002-2999-0752; e-mail: ekaterinagolovina@yandex.ru

**КАЛАЧ Андрей Владимирович**, д.х.н., профессор, Воронежский государственный технический университет (ВГТУ), Россия, 394006, г. Воронеж, ул. 20-летия Октября, 84; Воронежский институт Федеральной службы исполнения наказаний, Россия, 394072, г. Воронеж, ул. Иркутская, 1-а; РИНЦ ID: 195516; ORCID: 0000-0002-8926-3151; e-mail: a\_kalach@mail.ru

**Скоробогатов Виталий Александрович**, генеральный директор, ООО «ТЕРРИТОРИЯ», Россия, 143430, Московская область, г. о. Красногорск, рп. Нахабино, ул. Вокзальная, 25Б, офис 6; ORCID: 0009-0001-7097-6805; e-mail: skorobogatov.ntc@yandex.ru

**Вклад авторов:** *все авторы сделали эквивалентный вклад в подготовку публикации. Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.*

### Information about the authors

**Ekaterina V. GOLOVINA**, Cand. Sci. (Eng.), Senior Researcher, 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, Mira St., 22, Yekaterinburg, Sverdlovsk Region, 620062, Russian Federation; ID RSCI: 846886; ORCID: 0000-0002-2999-0752; e-mail: ekaterinagolovina@yandex.ru

**Andrey V. KALACH**, Dr. Sci. (Chem.), Professor, Voronezh State Technical University (VSTU), 20th Anniversary of October St., 84, Voronezh, 394006, Russian Federation; Voronezh Institute of the Federal Penitentiary Service of Russia, Irkutskaya St., 1-a, Voronezh, 394072, Russian Federation; ID RSCI: 195516; ORCID: 0000-0002-8926-3151; e-mail: a\_kalach@mail.ru

**Vitaly A. Skorobogatov**, Deputy General Director, LLC "TERRITORY", 25B, office 6, Vokzalnaya St., Moscow region, Krasnogorsk, Nakhabino district, 143430, Russian Federation; ORCID: 0009-0001-7097-6805; e-mail: skorobogatov.ntc@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. 2025. Т. 34. № 4. С. 73–82  
 POZHAROVZRYVOBEZOPASNOST/FIRE AND EXPLOSION SAFETY. 2025; 34(4):73-82

НАУЧНАЯ СТАТЬЯ/RESEARCH PAPER

УДК 614.841

<https://doi.org/10.22227/0869-7493.2025.34.04.73-82>

## Оценка пожарной опасности гостиниц с учетом параметров терморазложения мягких элементов мебели

Сергей Викторович Пузач<sup>1</sup>, Наталия Ивановна Константинова<sup>2</sup>✉,  
 Руслан Гянджавиевич Акперов<sup>1</sup>, Александр Олегович Овчинников<sup>1</sup>

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

<sup>2</sup> 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.** Пожарная опасность мягкой мебели в гостиничных номерах обусловлена наличием в ее составе легковоспламеняемых компонентов, таких как обивочные ткани, внутренние наполнители и элементы каркаса. Однако при проведении расчетов динамики опасных факторов пожара в гостиничных комплексах не учитываются пожароопасные свойства мягкой мебели, что может привести к недооценке токсикологической опасности для людей в процессе эвакуации.

Целью данной работы является оценка пожарной опасности гостиничных комплексов с массовым пребыванием людей на основе математического моделирования пожара с учетом использования экспериментальных данных по терморазложению мягких мебельных элементов.

**Методы исследований.** Проведено математическое моделирование распространения опасных факторов пожара в типовой секции гостиничных комплексов с использованием горючих нагрузок, приведенных в базе данных и полученных авторами.

**Результаты исследований и их обсуждение.** Обнаружено, что параметры горючей нагрузки, приведенные в существующей базе данных, приводят к недооценке воздействия токсичных газов на людей во время их эвакуации.

Учет терморазложения мягких элементов мебели в отличие от стандартной горючей нагрузки показал образование смеси высокотоксичных газов — оксида углерода, хлористого водорода и циановодорода. При этом парциальная плотность циановодорода может достигнуть критического значения до начала выхода людей из помещений без очага пожара.

Показано, что безопасная эвакуация людей не обеспечивается, так как практически во всех рассматриваемых сценариях пожара опасные факторы пожара блокируют эвакуационный выход с рассматриваемой типовой гостиничной секции до начала эвакуации людей, находящихся в помещениях без очага пожара.

**Выводы.** Необходимо получение актуальных данных о пожароопасных свойствах современных полимерных материалов, используемых при изготовлении и эксплуатации мягкой мебели и представляющих серьезную опасность с точки зрения создания токсикологической среды при их термическом разложении.

**Ключевые слова:** токсичность; циановодород; математическое моделирование пожара; пожарная нагрузка; эвакуация; монооксид углерода; парциальная плотность; критическая концентрация

**Для цитирования:** Пузач С.В., Константинова Н.И., Акперов Р.Г., Овчинников А.О. Оценка пожарной опасности гостиниц с учетом параметров терморазложения мягких элементов мебели // Пожаровзрывобезопасность/ Fire and Explosion Safety. 2025. Т. 34. № 4. С. 73–82. DOI: 10.22227/0869-7493.2025.34.04.73-82

✉ Константинова Наталия Ивановна, e-mail: konstantinova\_n@inbox.ru

## Assessing hotel fire hazards with regard for parameters of thermal decomposition of upholstered furniture elements

Sergey V. Puzach<sup>1</sup>, Natalia I. Konstantinova<sup>2</sup>✉, Ruslan G. Akperov<sup>1</sup>, Aleksandr O. Ovchinnikov<sup>1</sup>

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

<sup>2</sup> 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.** Upholstered furniture in hotel rooms has a fire hazard due to flammable components, such as upholstery fabrics, fillers, and frame elements. However, analysis of fire hazards and their development patterns in hotel buildings disregards flammability properties of upholstered furniture. This can involve an underestimation of toxicological hazards for people in the course of evacuation.

The mission of this work is to assess fire hazards in crowded hotels buildings using mathematical modeling of fire and experimentally obtained information about the thermal decomposition of upholstered furniture.

**Research methods.** Mathematical modeling was employed to simulate the development of fire hazards in a standard hotel section; fire load values were taken from the database and contributed to the simulation.

**Research results and their discussion.** Parameters of fire loads, extracted from the database, can cause an underestimation of the effect of toxic gases on humans during evacuation.

Unlike standard combustible loads, emission of a mixture of highly toxic gases, such as carbon monoxide, hydrogen cyanide and hydrogen chloride, accompanies the thermal decomposition of upholstered furniture elements. Hence, partial density of hydrogen cyanide can reach a critical value before humans can start leaving hotel premises that have no fire sources.

The authors demonstrate that safe evacuation of people is unfeasible, because almost each of the five scenarios involves fire hazards that block evacuation exits from a standard hotel section before humans can evacuate from rooms without fire sources.

**Conclusion.** It is necessary to obtain relevant data on flammability properties of advanced polymers used to make and take care of upholstered furniture, since the thermal decomposition of such polymers can create a toxicological environment.

**Keywords:** toxicity; hydrogen cyanide; mathematical modeling of fire; fire load; evacuation; carbon monoxide; partial density; critical concentration

**For citation:** Puzach S.V., Konstantinova N.I., Akperov R.G., Ovchinnikov A.O. Assessing hotel fire hazards with regard for parameters of thermal decomposition of upholstered furniture elements. *Pozharovzryvobezopasnost/ Fire and Explosion Safety*. 2025; 34(4):73-82. DOI: 10.22227/0869-7493.2025.34.04.73-82 (rus).

✉ Natalia Ivanovna Konstantinova, e-mail: konstantinova\_n@inbox.ru

**Введение**

Современное общество все больше осознает важность защиты окружающей среды и заботы о здоровье потребителей, что, в том числе, тесно связано с прогрессом в области текстильной промышленности. Материалы текстильного происхождения, особенно синтетические, заняли прочное место в повседневной жизни благодаря таким качествам, как доступность, прочность и универсальность. Пожарная опасность мягкой мебели в гостиничных номерах обусловлена наличием в ее составе легко воспламеняемых компонентов, таких как обивочные ткани, набивочные материалы и элементы каркаса. В помещении они способны легко воспламениться и быстро распространять пламя по поверхности других отделочных материалов, тем самым увеличивая интенсивность развития пожара и ограничивая видимость человека как в помещениях, так и на путях эвакуации. Кроме того, при их сгорании выделяются летучие токсичные соединения, представляющие серьезную угрозу здоровью людей [1, 2].

Вопросы, связанные с изучением пожарной опасности мягкой мебели, рассматриваются многими специалистами и включают комплексные исследования методологии оценки ее воспламеняемости [3, 4], разработку изделий пониженной горючести [5–7], выявление эффективных огнезащитных средств [8, 9].

Более сложным и малоизученным вопросом остается оценка токсикологических характеристик не-

которых продуктов горения текстильных изделий, представляющих собой сочетания различных по химической природе полимерных материалов. Работы в этом направлении связаны с изучением механизма комбинированного токсикологического действия продуктов горения полимеров, а также исследованием противопожарных мероприятий [10–13].

Эти обстоятельства свидетельствуют об актуальности продолжения научных исследований в этом направлении, поскольку позволят установить более четкое представление обеспечения пожарной безопасности в общественном и жилом секторе с учетом проведенных научных исследований.

В настоящее время получает полномасштабную реализацию обновленный национальный проект «Туризм и индустрия гостеприимства», направленный на увеличение социальной и экономической роли туризма в развитии Российской Федерации<sup>1</sup>. Одним из приоритетных условий реализации социальной функции туризма является повышение доступности туристских услуг для населения, в том числе удобство размещения в гостиницах, отелях, апарта-отелях, разнообразных туристических комплексах и т.п.

Гостиницы могут быть размещены как в отдельном стоящем здании, в помещениях общественных и многофункциональных зданий, в отдельных сек-

<sup>1</sup> О национальных целях развития Российской Федерации на период до 2030 года : Указ Президента Российской Федерации № 474 от 21 июля 2020 г.

циях, смежных с секциями жилых многоквартирных зданий, так и во встроенных и встроенно-пристроенных помещениях общественного назначения<sup>2</sup>.

Поскольку гостиницы являются объектами массового пребывания людей, включая ночное пребывание, обеспечение безопасности для проживающих там лиц становится первоочередной задачей. Гостиницы относятся к объектам класса функциональной пожарной опасности Ф 1.2<sup>3</sup>, что подразумевает повышенные требования к мерам пожарной безопасности. Однако требований к ограничению применения легковоспламеняемых текстильных изделий, таких как мягкая мебель, шторы и прочее, существующими нормами не предусмотрено.

Важно учесть, что проживающие в гостинице люди находятся в незнакомой им обстановке, что усложняет ориентацию в пространстве и поиск эвакуационных выходов. Также стоит отметить, что сон, усталость, вызванная сменой часовых поясов, и возможное непонимание русского языка могут затруднить быструю реакцию на сигнал эвакуации при пожаре.

Известно немало трагедий, связанных с крупными пожарами в гостиницах, среди которых наиболее известны случаи в гостиницах «Россия» и «Ленинград», а к недавним крупным пожарам в гостиницах можно отнести:

- 17 декабря 2023 года — пожар в гостиничном комплексе «Европа» в городе Астрахани. Причина пожара еще устанавливается;
- 24 января 2024 года — пожар в гостиничной развлекательной зоне комплекса «Роял» в Хабаровске;
- 17 февраля 2024 года — пожар в гостинице «Дружба» в городе Абакане;
- 21 января 2025 года — пожар в отеле GRANT Kartal на горнолыжном курорте (Турция).

Анализ причин пожаров в гостиницах показывает, что основными причинами возгорания легковоспламеняемых материалов являются неисправности электрооборудования, неправильное использование электроприборов и электропроводки, курение в запрещенных зонах, небрежное обращение с огнем и умышленные поджоги.

Специалистами изучаются условия безопасной эвакуации из гостиниц за счет объемно-планировочных решений [14, 15], разрабатываются современные требования к проектированию систем противопожарной защиты зданий [16], однако вопросам ограничения применения легковоспламеняемых текстильных материалов в гостиничных номерах уделено еще недостаточно внимания.

<sup>2</sup> СП 257.1325800.2020. Здания гостиниц. Правила проектирования.

<sup>3</sup> Технический регламент о требованиях пожарной безопасности : Федеральный закон от 22 июля 2008 г. № 123-ФЗ // Гарант.ру: информационно-правовой портал. URL: <http://base.garant.ru/12161584/>

Целью данной работы является оценка пожарной опасности гостиничных комплексов с массовым пребыванием людей на основе математического моделирования пожара с учетом использования экспериментальных данных по терморазложению мягких мебельных элементов.

## Методы исследований

Для достижения поставленной цели проведено математическое моделирование распространения опасных факторов пожара в типовой секции гостиничных комплексов с использованием свойств горючих нагрузок, приведенных в базе данных [17] и полученных авторами статей<sup>4</sup> [18, 19].

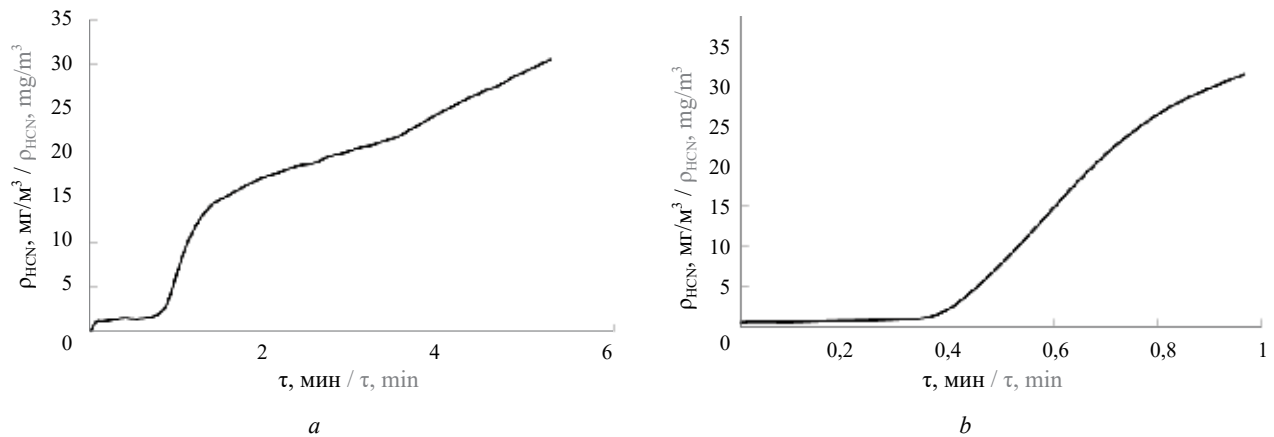
## Результаты исследований и их обсуждение

В качестве исходных данных для математического моделирования распространения опасных факторов пожара в гостиничном здании помимо горючей нагрузки «здания I–II степени огнестойкости; мебель + ткани», приведенной в существующей базе данных [17], принималась горючая нагрузка «мягкие элементы мебели», определенная ранее по результатам проведенных экспериментальных исследований [19] на установке для определения пожарной опасности конденсированных материалов при их термическом разложении<sup>4</sup> [19].

На рисунке представлены ранее полученные зависимости парциальной плотности выделения циановодорода (как одного из наиболее опасных газообразных токсичных компонентов) от времени проведения эксперимента образцов элементов мягкой мебели, состоящих из обивочной ткани из полиэфирных волокон (ПЭ) различной плотности ( $\rho$ , г/см<sup>2</sup>), прокладочного термостойкого материала и наполнителя — вспененного полиуретана (ППУ) [19]. При этом необходимо отметить, что в базе данных [17] горючих нагрузок отсутствуют сведения об образовании циановодорода.

Параметры рассматриваемых горючих нагрузок представлены в табл. 1, где:  $Q_n^p$  — низшая рабочая теплота сгорания, МДж/кг;  $\psi_{уд}$  — удельная скорость выгорания, кг/(м<sup>2</sup>·с);  $D_{уд}$  — удельное дымовыделение, Нп·м<sup>2</sup>/кг;  $w_d$  — линейная скорость распространения пламени, м/с;  $L_{O_2}$  — удельный коэффициент потребления кислорода;  $L_{CO}$ ,  $L_{CO_2}$ ,  $L_{HC}$ ,  $L_{HCN}$  — удельные коэффициенты образования токсичных газов (монооксида углерода, диоксида углерода, хлороводорода и циановодорода).

<sup>4</sup> Патент РФ на полезную модель № 174688. Установка для определения пожарной опасности конденсированных материалов при их термическом разложении / Сулейкин Е.В., Акперов Р.Г., Пузач С.В.; заявка 20.04.2017; регистрация 26.10.2017. Бюллетень № 30–2017.



Зависимости парциальной плотности циановодорода от времени при испытании образца ПЭ ( $\rho = 260 \text{ г/см}^2$ ) + ППУ (a) и образца ПЭ ( $\rho = 550 \text{ г/см}^2$ ) + ППУ (b)

Dependencies between partial density of hydrogen cyanide and time in the course of testing a PE (polyester) specimen ( $\rho = 260 \text{ g/cm}^2$ ) + PPU (a) and a PE specimen ( $\rho = 550 \text{ g/cm}^2$ ) + PPU (foamed polyurethane) (b)

Таблица 1. Параметры рассматриваемых горючих нагрузок  
Table 1. Parameters of combustible loads

| Параметры<br>Parameters   | Мягкие элементы мебели: ПЭ<br>( $\rho = 260 \text{ г/см}^2$ ) + ППУ [10]<br>Upholstered furniture elements:<br>PE ( $\rho = 260 \text{ g/cm}^2$ ) + PPU [10] | Мягкие элементы мебели:<br>ПЭ ( $\rho = 550 \text{ г/см}^2$ ) + ППУ<br>Upholstered furniture<br>elements:<br>PE ( $\rho = 550 \text{ g/cm}^2$ ) + PPU | Здания I–II степени огне-<br>стойкости; мебель + ткани [17]<br>Buildings of the 1st–2nd fire<br>resistance classes;<br>furniture + fabrics [17] |
|---|--|---|---|
| $Q_n^p$ , МДж/кг<br>$Q_{\text{lowest}}^{\text{heat value}}$ , MJ/kg   | 31,33  | 24,67   | 14,7  |
| $\Psi_{\text{уд}}$ , кг/(м <sup>2</sup> ·с)<br>$\Psi_{\text{normalized burnout velocity}}$ , kg/(m <sup>2</sup> ·s) | 0,015  | 0,004   | 0,0145  |
| $D_{\text{уд}}$ , Нп·м <sup>2</sup> /кг<br>$D_{\text{normalized smoke emission}}$ , Np·m <sup>2</sup> /kg           | 889  | 753   | 82  |
| $w_{\text{л}}$ , м/с<br>$w_{\text{linear flame velocity}}$ , m/s  | 0,0021   | 0,0021  | 0,0108  |
| $L_{\text{O}_2}$  | –1   | –1  | –1,437  |
| $L_{\text{CO}}$   | 0,131  | 0,131   | 0,0022  |
| $L_{\text{CO}_2}$   | 1,26   | 2,73  | 1,285   |
| $L_{\text{HCl}}$  | 0,006  | 0,006   | 0,006   |
| $L_{\text{HCN}}$  | 0,0141   | 0,0317  | –   |

Моделирование динамики развития пожара проводилось с использованием аналитического решения интегральной модели<sup>5</sup> [17] при следующих исходных данных: коэффициент теплопотерь  $\phi = 0,3$ ; коэффициент отражения предметов на путях эвакуации  $\alpha = 0,3$ ; начальная освещенность  $E = 50 \text{ лк}$ .

Использовалась программа для ЭВМ, имеющая свидетельство об официальной регистрации программы в Федеральной службе РФ по интел-

лектуальной собственности, патентам и товарным знакам<sup>6</sup>.

Моделирование проводилось для одной типовой гостиничной секции с различной площадью коридора при устройстве одного эвакуационного выхода на лестничную клетку.

Рассматривались три сценария развития пожара, отличающиеся видом горючей нагрузки.

<sup>5</sup> Об утверждении методики определения расчетных величин пожарного риска в зданиях, сооружениях и пожарных отсеках различных классов функциональной пожарной опасности : Приказ МЧС России № 1140 от 14.11.2022.

<sup>6</sup> Лузач С.В. Интегральные, зонные и полевые методы расчета динамики опасных факторов пожара. Свидетельство об официальной регистрации программы № 2006614238 в Федеральной службе по интеллектуальной собственности, патентам и товарным знакам от 08.12.2006 г.

При сценарии № 1 принималась нагрузка «здания I–II степени огнестойкости; мебель + ткани, таблица».

В случае сценария № 2 рассматривалась модель типового среднегабаритного дивана (ПЭ ( $\rho = 260 \text{ г/см}^2$ ) + ППУ, таблица), расположенного в помещении гостиничного номера напротив оконного проема. Горючая нагрузка «ПЭ ( $\rho = 550 \text{ г/см}^2$ ) + ППУ» принималась в качестве исходных данных для сценария № 3.

В отличие от сценария № 1 в сценариях № 2 и 3 учитывается образование высокотоксичного газа — циановодорода (табл. 1).

В табл. 2–4 представлены величины времен блокирования путей эвакуации наиболее опасными факторами пожара для всех сценариев развития пожара [20].

Обозначения в табл. 2–4:  $F$  — площадь пола помещения,  $\text{м}^2$ ;  $H$  — высота помещения, м;  $V$  — сво-

**Таблица 2.** Времена блокирования путей эвакуации опасными факторами пожара в случае сценария № 1  
**Table 2.** The time for evacuation routes to be blocked by fire hazards according to Scenario 1

| Номер<br>Number | $F, \text{ м}^2$<br>$F, \text{ м}^2$ | $H, \text{ м}$<br>$H, \text{ м}$ | $V, \text{ м}^3$<br>$V, \text{ м}^3$ | $\tau_{\text{г}}, \text{ с}$<br>$\tau_{\text{г}}, \text{ с}$ | $\tau_{\text{Т}}, \text{ с}$<br>$\tau_{\text{Т}}, \text{ с}$ | $\tau_{\text{O}_2}, \text{ с}$<br>$\tau_{\text{O}_2}, \text{ с}$ | $\tau_{\text{CO}_2}, \text{ с}$<br>$\tau_{\text{CO}_2}, \text{ с}$ | $\tau_{\text{HCN}}, \text{ с}$<br>$\tau_{\text{HCN}}, \text{ с}$ | $\tau_{\text{CO}_2}, \text{ с}$<br>$\tau_{\text{CO}_2}, \text{ с}$ | $\tau_{\text{HC}_1}, \text{ с}$<br>$\tau_{\text{HC}_1}, \text{ с}$ | $\tau_{\text{H}_2}, \text{ с}$<br>$\tau_{\text{H}_2}, \text{ с}$ | $\tau_{\text{H}_2}, \text{ с}$<br>$\tau_{\text{H}_2}, \text{ с}$ | $\tau_{\text{H}_2}, \text{ с}$<br>$\tau_{\text{H}_2}, \text{ с}$ |
|-----------------|--------------------------------------|----------------------------------|--------------------------------------|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|
| 1               | 30                                   | 3,0                              | 72                                   | 95,0   | 89,2   | 98,8   | –  | –  | –  | 80,4   | 64,3   | 110  |  |
| 2               | 60                                   | 3,0                              | 144                                  | 105,8  | 112,4  | 124,5  | –  | –  | –  | 101,3  | 81,0   |  |  |
| 3               | 120                                  | 3,0                              | 288                                  | 118,1  | 141,6  | 156,8  | –  | –  | –  | 127,6  | 94,5   |  |  |
| 4               | 180                                  | 3,0                              | 432                                  | 126,1  | 162,1  | 179,5  | –  | –  | –  | 146,1  | 100,9  |  |  |
| 5               | 300                                  | 3,0                              | 720                                  | 137,0  | 192,2  | 212,8  | –  | –  | –  | 173,2  | 109,6  |  |  |

**Таблица 3.** Времена блокирования путей эвакуации опасными факторами пожара в случае сценария № 2  
**Table 3.** The time for evacuation routes to be blocked by fire hazards according to Scenario 2

| Номер<br>Number | $F, \text{ м}^2$<br>$F, \text{ м}^2$ | $H, \text{ м}$<br>$H, \text{ м}$ | $V, \text{ м}^3$<br>$V, \text{ м}^3$ | $\tau_{\text{г}}, \text{ с}$<br>$\tau_{\text{г}}, \text{ с}$ | $\tau_{\text{Т}}, \text{ с}$<br>$\tau_{\text{Т}}, \text{ с}$ | $\tau_{\text{O}_2}, \text{ с}$<br>$\tau_{\text{O}_2}, \text{ с}$ | $\tau_{\text{CO}_2}, \text{ с}$<br>$\tau_{\text{CO}_2}, \text{ с}$ | $\tau_{\text{HCN}}, \text{ с}$<br>$\tau_{\text{HCN}}, \text{ с}$ | $\tau_{\text{CO}_2}, \text{ с}$<br>$\tau_{\text{CO}_2}, \text{ с}$ | $\tau_{\text{HC}_1}, \text{ с}$<br>$\tau_{\text{HC}_1}, \text{ с}$ | $\tau_{\text{H}_2}, \text{ с}$<br>$\tau_{\text{H}_2}, \text{ с}$ | $\tau_{\text{H}_2}, \text{ с}$<br>$\tau_{\text{H}_2}, \text{ с}$ | $\tau_{\text{H}_2}, \text{ с}$<br>$\tau_{\text{H}_2}, \text{ с}$ |
|-----------------|--------------------------------------|----------------------------------|--------------------------------------|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|
| 1               | 30                                   | 3,0                              | 72                                   | 78,0   | 128,7  | 135,4  | 212,9  | 87,0   | –  | 152,1  | 62,4   | 110  |  |
| 2               | 60                                   | 3,0                              | 144                                  | 87,5   | 162,1  | 170,6  | 268,2  | 109,6  | –  | 191,6  | 70,0   |  |  |
| 3               | 120                                  | 3,0                              | 288                                  | 98,1   | 204,3  | 215,0  | 337,9  | 138,1  | –  | 241,4  | 78,5   |  |  |
| 4               | 180                                  | 3,0                              | 432                                  | 104,9  | 233,8  | 246,1  | 386,8  | 158,1  | –  | 276,4  | 83,9   |  |  |
| 5               | 300                                  | 3,0                              | 720                                  | 114,2  | 277,2  | 291,8  | 458,7  | 187,4  | –  | 327,7  | 91,3   |  |  |

**Таблица 4.** Времена блокирования путей эвакуации опасными факторами пожара в случае сценария № 3  
**Table 4.** The time for evacuation routes to be blocked by fire hazards according to Scenario 3

| Номер<br>Number | $F, \text{ м}^2$<br>$F, \text{ м}^2$ | $H, \text{ м}$<br>$H, \text{ м}$ | $V, \text{ м}^3$<br>$V, \text{ м}^3$ | $\tau_{\text{г}}, \text{ с}$<br>$\tau_{\text{г}}, \text{ с}$ | $\tau_{\text{Т}}, \text{ с}$<br>$\tau_{\text{Т}}, \text{ с}$ | $\tau_{\text{O}_2}, \text{ с}$<br>$\tau_{\text{O}_2}, \text{ с}$ | $\tau_{\text{CO}_2}, \text{ с}$<br>$\tau_{\text{CO}_2}, \text{ с}$ | $\tau_{\text{HCN}}, \text{ с}$<br>$\tau_{\text{HCN}}, \text{ с}$ | $\tau_{\text{CO}_2}, \text{ с}$<br>$\tau_{\text{CO}_2}, \text{ с}$ | $\tau_{\text{HC}_1}, \text{ с}$<br>$\tau_{\text{HC}_1}, \text{ с}$ | $\tau_{\text{H}_2}, \text{ с}$<br>$\tau_{\text{H}_2}, \text{ с}$ | $\tau_{\text{H}_2}, \text{ с}$<br>$\tau_{\text{H}_2}, \text{ с}$ | $\tau_{\text{H}_2}, \text{ с}$<br>$\tau_{\text{H}_2}, \text{ с}$ |
|-----------------|--------------------------------------|----------------------------------|--------------------------------------|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|
| 1               | 30                                   | 3,0                              | 72                                   | 128,1  | 216,5  | 229,3  | 323,1  | 102,7  | –  | 234,4  | 82,2   | 110  |  |
| 2               | 60                                   | 3,0                              | 144                                  | 143,6  | 272,8  | 288,9  | 407,0  | 129,4  | –  | 295,4  | 103,5  |  |  |
| 3               | 120                                  | 3,0                              | 288                                  | 161,0  | 343,7  | 364,0  | 512,8  | 163,1  | –  | 372,1  | 128,8  |  |  |
| 4               | 180                                  | 3,0                              | 432                                  | 172,2  | 393,4  | 416,6  | 587,0  | 186,7  | –  | 426,0  | 137,8  |  |  |
| 5               | 300                                  | 3,0                              | 720                                  | 187,4  | 466,4  | 494,0  | 696,0  | 221,3  | –  | 505,1  | 150,0  |  |  |

бодный объем помещения, равный 80 % от объема помещения, ограниченного ограждающими конструкциями,  $m^3$ ;  $\tau_v$ ,  $\tau_T$ ,  $\tau_{O_2}$ ,  $\tau_{CO}$ ,  $\tau_{HCN}$ ,  $\tau_{CO_2}$ ,  $\tau_{HC_1}$  — времена блокирования путей эвакуации по снижению видимости, температуре, кислороду, оксиду углерода, циановодороду, диоксиду углерода и хлористому водороду, с;  $\tau_n$  — необходимое время эвакуации, с;  $\tau_{нз}$  — время начала эвакуации, с; «—» — данный опасный фактор пожара не достиг своего критического значения.

Анализ результатов расчета показал, что использование в качестве исходных данных горючей нагрузки «здания I–II степени огнестойкости; мебель + ткани» (сценарий № 1) приводит к недооценке воздействия токсичных газов на людей во время их эвакуации из гостиничной секции по сравнению со сценариями № 2 и 3 по следующим причинам:

- не учитывается образование такого высокотоксичного газа, как циановодород (во всех горючих нагрузках базы данных) [17];
- образование монооксида углерода по его массе занижено приблизительно в 50 раз, поэтому блокирования путей эвакуации по этому газу при сценарии № 1 не происходит.

Таким образом, сценарий № 1 не учитывает образование высокотоксичной смеси газов — оксида углерода, циановодорода и хлористого водорода.

### Оценка выполнения условия безопасной эвакуации людей

Проведем оценку выполнения условия безопасной эвакуации людей без учета движения людских потоков.

Здания гостиниц в соответствии с нормативным документом<sup>7</sup> относятся к классу функциональной пожарной опасности Ф1.2.

В соответствии с вышеуказанным нормативным документом, для зданий, оборудованных системой пожарной сигнализации (или автоматическими установками пожаротушения, выполняющими функцию системы пожарной сигнализации) и системой оповещения и управления эвакуацией:

- время начала эвакуации при пожаре для зданий класса функциональной пожарной опасности Ф1 составляет 60 с;
- время достижения порогового значения срабатывания пожарного извещателя принимаем равным минимальному значению 30 с;
- время задержки, связанное с инерционностью системы обнаружения пожара, допускается принимать равным 20 с;

<sup>7</sup> ФЗ № 123. Технический регламент о требованиях пожарной безопасности. М. : ФГУ ВНИИПО МЧС России, 2008. 156 с.

- время задержки, связанное с задержкой оповещения людей при пожаре, принимаем равным нулю. Тогда суммарное время начала эвакуации составляет  $\tau_{нз} = 110$  с.

Из анализа табл. 2–4 видно, что блокирование людей, находящихся в помещениях без очага пожара, происходит:

- в случае сценариев № 1 и 2 — при всех рассматриваемых площадях (табл. 2 и 3);
- при сценарии № 3 при площади, меньшей 60  $m^2$  (табл. 4).

Поэтому во всех рассматриваемых сценариях опасные факторы пожара блокируют единственный эвакуационный выход с рассматриваемой типовой гостиничной секции на его ранних стадиях, воздействуя на людей, находящихся в помещениях (номерках) без очага пожара еще до начала процесса эвакуации: необходимые времена эвакуации меньше времени начала эвакуации (табл. 2–4). Таким образом, обеспечить безопасную эвакуацию людей не представляется возможным.

Кроме того, с учетом параметров терморазложения мягких элементов мебели блокирование путей эвакуации до начала выхода людей из помещений без очага пожара таким высокотоксичным газом, как циановодород происходит в случае сценария № 2 при площади, меньшей 60  $m^2$ , а при сценарии № 3 при площади, меньшей 30  $m^2$ .

### Выводы

Проведенная оценка пожарной опасности гостиничных комплексов с массовым пребыванием людей на основе математического моделирования пожара с учетом использования экспериментальных данных по терморазложению мягких элементов мебели показала, что известные параметры горючей нагрузки, согласно существующей базе данных [17], не учитывают наиболее опасные токсичные летучие продукты горения.

С учетом большого ассортимента современных полимерных материалов, используемых при изготовлении и эксплуатации мягкой мебели [21–23] и представляющих повышенную пожарную опасность не только от легкости воспламенения, но и возможности негативного воздействия продуктов горения на организм человека, следует учитывать качественный состав и концентрации выделяющихся токсичных газов.

Определение и создание условий наиболее опасного режима термического разложения материалов, оценка его параметров позволят повысить достоверность оценки уровня воздействия на людей и имущество его опасных факторов.

## СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Константинова Н.И. Огнезащита текстильных материалов : дис. ... д-ра техн. наук. М., 2004. 277 с. EDN NOXTSR.
2. Константинова Н.И., Зубань А.В., Поединцев Е.А., Кривошапкина О.В. Пожарная опасность декоративных текстильных изделий в помещениях общественных зданий и сооружений // Пожаровзрывобезопасность/Fire and explosion safety. 2024. № 34 (6). С. 14–25. DOI: 10.22227/0869-7493.2024.33.06.14-25. EDN YOPFLM.
3. Zammarano M., Hoehler M.S., Shields J.R., Thompson A.L., Kim I., Leventon I.T. et al. Fullscale experiments to demonstrate flammability risk of residential upholstered furniture and mitigation using barrier fabric // Technical Note (NIST TN) National Institute of Standards and Technology. 2020. P. 66. DOI: 10.6028/NIST.TN.2129
4. Константинова Н.И., Зубань А.В., Булгакова А.А. Совершенствование методологического подхода к оценке пожарной опасности матрасов // Пожаровзрывобезопасность/Fire and Explosion Safety. 2022. № 31 (2). С. 22–32. DOI: 10.22227/0869-7493.2022.31.02.22-32. EDN EXCIJS.
5. Nazaré S., Davis R.D. A review of fire blocking technologies for soft Furnishings // Fire Science Reviews. 2012. No. 1 (1). Pp. 1–23. DOI: 10.1186/2193-0414-1-1. URL: <http://www.firesciencereviews.com/content/1/1/1>
6. 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. No. 31 (5). Pp. 1473–1483. DOI: 10.1111/ina.12805
7. 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. No. 11 (4). Pp. 509–516. DOI: 10.1016/j.shaw.2020.07.004. EDN DODWAC.
8. Бесшапошникова В.И., Микрюкова О.Н., Загоруйко М.В., Штейнле В.А. Исследование влияния огнезащитной модификации на структуру и свойства смесовых тканей // Материалы и технологии. 2018. № 1 (1). С. 37–42. DOI: 10.24411/2617-1503-2018-11007. EDN XUXXP.
9. Horrocks A.R. Textile flammability research since 1980 — Personal challenges and partial solutions // Polymer Degradation and Stability. 2013. No. 98 (12). Pp. 2813–2824. DOI: 10.1016/j.polymdegradstab.2013.10.004
10. Толкач П.Г., Башарин В.А., Чепур С.В., Венгерович Н.Г., Юдин М.А., Никифоров А.С. и др. Токсикология продуктов горения полимерных материалов : учебное пособие. СПб. : ООО «Издательство «Левша. Санкт-Петербург», 2022. 104 с. EDN WJXUDA.
11. Чернушевич Е.В., Ширинкин П.В. Особенности определения токсичности продуктов горения строительных материалов // Сибирский пожарно-спасательный вестник : научно-аналитический журнал. 2020. № 1 (16). С. 22–28. DOI: 10.34987/vestnik.sibpsa.2020.16.1.004. EDN ZWQBFG.
12. Шишонков М.Ф., Карманов Е.Ю., Уколов А.И., Земляной А.В., Ерунова Н.В., Николаев А.И. и др. Исследование токсичности продуктов горения полимерных материалов с применением хромато-масс-спектрометрии // Токсикологический вестник. 2022. № 30 (3). С. 167–176. DOI: 10.47470/0869-7922-2022-30-3-167-176. EDN ASTAIL.
13. 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. № 32 (1). С. 41–50. DOI: 10.22227/0869-7493.2023.32.01.41-50. EDN JUCUFG.
14. Gravit M., Kirik E., Shabunina D., Karimova E., Khlebnikova K. Wood-Frame Hotel Building: Fire Curtains and Evacuation Analysis // Construction of Unique Buildings and Structures. 2023. No. 3 (108). P. 10804. DOI: 10.4123/CUBS.108.4
15. Gravit M., Dmitriev I., Kuzenkov K., Lunyakov M. Dependence of the Human Flow // Density from the Staircase and Exit Width. E3S Web of Conferences. 2019. No. 91. P. 05017 DOI: 10.1051/e3sconf/20199105017
16. Пехотиков А.В., Абашкин А.А., Гомозов А.В., Голкин А.В. Современные требования по противопожарной защите многоквартирных жилых зданий с применением конструкций из перекрестноклееной древесины // Пожаровзрывобезопасность/Fire and Explosion Safety. 2023. № 32 (1). С. 28–40. DOI: 10.22227/0869-7493.2023.32.01.28-40. EDN MFBTNE.
17. Кошмаров Ю.А. Прогнозирование опасных факторов пожара в помещении : учебное пособие. М. : Академия ГПС МВД России, 2000. 118 с.
18. Пузач С.В., Акперов Р.Г., Константинова Н.И., Овчинников А.О. Математическое моделирование распространения опасных факторов пожара на примере типового гостиничного комплекса при горении мягкой мебели // Ройтмановские чтения : сб. мат. XIII науч.-практ. конф. М. : Академия ГПС МЧС России, 2025. С. 113–115. URL: <https://roytman.online/>

19. 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. № 33 (1). С. 51–59. DOI: 10.22227/0869-7493.2024.33.01.51-59. EDN AGHGSE.
20. Нгуен Туан Ань, Пузач С.В., Лебедченко О.С., Маламут О.Ю. Масштабный фактор при расчете времени блокирования путей эвакуации опасными факторами пожара // *Безопасность труда в промышленности*. 2025. № 3. С. 29–34. DOI: 10.24000/0409-2961-2025-3-29-34
21. Романов В.Ю., Бойко С.Ю., Трифонова Л.Б. Оптимизация технологического процесса выработки ткани для обивки мебели // *Технология текстильной промышленности*. 2024. № 2 (410). С. 124–128. DOI: 10.47367/0021-3497\_2024\_2\_124
22. Воронжева П.А., Осипова М.Л., Барыкин Д.И., Дамирова И., Бешапошникова В.И. Анализ ассортимента и исследование структуры и свойств мебельных тканей для интерьера и общественного транспорта // *Инновационное развитие техники и технологий в промышленности : сб. мат. Всеросс. науч. конф. молодых исследователей с междунар. участием*. М., 2023. С. 162–166.
23. Бешапошникова В.И. Научные основы проектирования и прогнозирования свойств изделий текстильной и легкой промышленности. Практикум : учебное пособие. М. : РГУ им. А.Н. Косыгина, 2019. 176 с.

## REFERENCES

1. Konstantinova N.I. Fire protection of textile materials : *dissertation of Doctor of Technical Sciences*. Moscow, 2004; 277. EDN NOXTSR. (rus).
2. Konstantinova N.I., Zuban A.V., Poedintsev E.A., Krivoshapkina O.V. Fire hazard of decorative textiles in the premises of public buildings and structures. *Pozharovzryvbezopasnost/Fire and Explosion Safety*. 2024; 33(6):14-25. DOI: 10.22227/0869-7493.2024.33.06.14-25. EDN YOPFLM. (rus).
3. Zammarano M., Hoehler M.S., Shields J.R., Thompson A.L., Kim I., Leventon I.T. et al. Bundy fullscale experiments to demonstrate flammability risk of residential upholstered furniture and mitigation using barrier fabric. *Technical Note (NIST TN) National Institute of Standards and Technology*. 2020; 66. DOI: 10.6028/NIST.TN.2129.2020
4. Konstantinova N.I., Zuban A.V., Bulgakova A.A. Improvement of a methodological approach to assessing the fire hazard of mattresses. *Pozharovzryvbezopasnost/Fire and Explosion Safety*. 2022; 31(2):22-32. DOI: 10.22227/0869-7493.2022.31.02.22-32. EDN EXCIJS. (rus).
5. Nazaré S., Davis R.D. A review of fire blocking technologies for soft Furnishings. *Fire Science Reviews*. 2012; 1(1):23. URL: <http://www.firesciencereviews.com/content/1/1/1>
6. 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
7. 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. EDN DODWAC.
8. Beshaposhnikova V.I., Mikryukova O.N., Zagoruiko M.V., Shteynle V.A. Study of the influence of fire-retardant modification on the structure and properties of blended fabrics. *Materials and technologies*. 2018; 1(1):37-42. DOI: 10.24411/2617-1503-2018-11007. EDN XUXXPN. (rus).
9. Horrocks A.R. Textile flammability research since 1980 — Personal challenges and partial solutions. *Polymer Degradation and Stability*. 2013; 98(12):2813-2824. DOI: 10.1016/j.polymdegradstab.2013.10.004
10. Tolkach P.G., Basharin V.A., Chepur S.V., Vengerovich N.G., Yudin M.A., Nikiforov A.S. et al. Toxicology of combustion products of polymeric materials. *Teaching aid*. St. Petersburg, LLC “Publishing House” Levsha St. Petersburg”, 2022; 104. EDN WJXUDA. (rus).
11. Chernushevich E.V., Shirinkin P.V. Features of Determining the Toxicity of Combustion Products of Building Materials. *Siberian Fire and Rescue Bulletin : Scientific and Analytical Journal*. 2020; 1(16):22-28. DOI: 10.34987/vestnik.sibpsa.2020.16.1.004. EDN ZWQBFQ. (rus).
12. Shishonok M.F., Karmanov E.Y., Ukolov A.I., Zemlyanoi A.V., Yrunova N.V., Nikolaev A.I. et al. Study of the Toxicity of Combustion Products of Polymer Materials Using Chromatographic Mass Spectrometry. *Toxicological Review*. 2022; 30(3):167-176. DOI: 10.47470/0869-7922-2022-30-3-167-176. EDN ASTAIL. (rus).
13. Puzach S.V., Bachurin D.V., Akperov R.G., Boldrushkiev O.B., Balaev A.A. Generation of toxic gases during the combustion of stuffed toys in multifunctional shopping malls. *Fire and Explosion Safety*. 2023; 32(1):41-50. DOI: 10.22227/0869-7493.2023.32.01.41-50. EDN JUCUFG. (rus).
14. Gravit M., Kirik E., Shabunina D., Karimova E., Khlebnikova K. Wood-Frame Hotel Building: Fire Curtains and Evacuation Analysis. *Construction of Unique Buildings and Structures*. 2023; 3(108):10804. DOI: 10.4123/CUBS.108.4
15. Gravit M., Dmitriev I., Kuzenkov K., Lunyakov M. Dependence of the Human Flow Density from the Staircase and Exit Width. *E3S Web of Conferences*, 2019; 91:5017. DOI: 10.1051/e3sconf/20199105017

16. Pekhotikov A.V., Abashkin A.A., Gomozev A.V., Golkin A.V. Modern requirements for fire protection of multi-apartment residential buildings having structures made of cross-laminated timber. *Pozharovzryvbezopasnost/Fire and Explosion Safety*. 2023; 32(1):28-40. DOI: 10.22227/0869-7493.2023.32.01.28-40. EDN MFBTNE. (rus).
17. Koshmarov Yu.A. Forecasting dangerous factors of fire in premises. *Study guide*. Moscow, Academy of GPS of the Ministry of Internal Affairs of Russia, 2000; 118. (rus).
18. Puzach S.V., Akperov R.G., Konstantinova N.I., Ovchinnikov A.O. Mathematical modeling of the spread of hazardous fire factors using the example of a typical hotel complex during combustion of upholstered furniture. *Roitman Readings : collection of materials from the 13th scientific and practical conference*. Moscow, Academy of the State Fire Service of the Ministry of Emergency Situations of Russia, 2025; 113-115. URL: <https://roytman.online/> (rus).
19. Puzach S.V., Konstantinova N.I., Akperov R.G., Ovchinnikov A.O. Investigation of Toxicity Parameters of the Combustion Products of Upholstered Furniture Elements. *Pozharovzryvbezopasnost/Fire and Explosion Safety*. 2024; 33(1):51-59. DOI: 10.22227/0869-7493.2024.33.01.51-59. EDN AGHGSE. (rus).
20. Nguyen Tuan Anh, Puzach S.V., Lebedchenko O.S., Malamut O.Yu. Scale factor when calculating the time to block evacuation path by hazardous factors of fire. *Occupational Safety in Industry*. 2025; 3:29-34. DOI: 10.24000/0409-2961-2025-3-29-34. (rus)
21. Romanov V.Yu., Boyko S.Yu., Trifonova L.B. Optimization of the technological process for manufacturing upholstery fabrics. *Textile Industry Technology*. 2024; 2(410):124-128. DOI: 10.47367/0021-3497\_2024\_2\_124 (rus).
22. Voronzheva P.A., Osipova M.L., Barykin D.I., Damirova I., Beshaposhnikova V.I. Analysis of the range and study of the structure and properties of furniture fabrics for interiors and public transport. Innovative development of equipment and technologies in industry : *collection of materials of the All-Russian Scientific Conference of young researchers with international participation*. Moscow, 2023; 162-166. (rus).
23. Besshaposhnikova V.I. Scientific bases of designing and forecasting properties of textile and light industry products. *Workshop : textbook*. Moscow, RSU named after A.N. Kosygin, 2019; 176. (rus.)

Поступила 25.06.2025, после доработки 17.07.2025;

принята к публикации 31.07.2025

Received June 25, 2025; Received in revised form July 17, 2025;

Accepted July 31, 2025

### Информация об авторах

**ПУЗАЧ Сергей Викторович**, д.т.н., профессор, заслуженный деятель науки РФ, начальник кафедры инженерной теплофизики и гидравлики, Академия Государственной противопожарной службы Министерства Российской Федерации по делам гражданской обороны, чрезвычайным ситуациям и ликвидации последствий стихийных бедствий, Россия, 129366, г. Москва, ул. Бориса Галушкина, 4; ResearcherID: U-2907-2019; AuthorID: 7003537835; ORCID: 0000-0001-7234-1339; e-mail: puzachsv@mail.ru

**КОНСТАНТИНОВА Наталия Ивановна**, д.т.н., 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**, к.т.н., доцент, доцент кафедры пожарной безопасности в строительстве в составе учебно-научного комплекса пожарной безопасности объектов защиты, Академия Государственной противопожарной службы Министерства Российской Федерации по делам гражданской обороны, чрезвычайным ситуациям и ликвидации

### Information about the authors

**Sergey V. PUZACH**, Dr. Sci. (Eng.), Professor, the Honored Scientist of the Russian Federation, Head of Thermal Physics and Hydraulic Department, the State Fire Academy of the Ministry of Russian Federation for Civil Defense, Emergencies and Elimination on Consequences of Natural Disasters, Borisa Galushkina St., 4, Moscow, 129366, Russian Federation; ResearcherID: U-2907-2019, AuthorID: 7003537835, ORCID: 0000000172341339; e-mail: puzachsv@mail.ru

**Nataliya I. KONSTANTINOVA**, Dr. Sci. (Eng.), Professor, principle 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: 57195464313; ORCID: 0000-0003-0778-0698; e-mail: konstantinova\_n@inbox.ru

**Ruslan G. AKPEROV**, Cand. Sci. (Eng.), Associate Professor, Associate Professor of the Department of Fire Safety in Construction as part of the educational and scientific complex of fire safety of protected facilities, the State Fire Academy of the Ministry of Russian Federation for Civil Defense, Emergencies and Elimination on Consequences of Natural Disasters,

последствий стихийных бедствий, Россия, 129366, г. Москва, ул. Бориса Галушкина, 4; ORCID: 0000-0002-2524-8710; e-mail: akperov01@mail.ru

**ОВЧИННИКОВ Александр Олегович**, слушатель института подготовки руководящих кадров, 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; доработка текста; итоговые выводы.*

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

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

*Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.*

Borisa Galushkina St., 4, Moscow, 129366, Russian Federation; ORCID: 0000-0002-2524-8710; e-mail: akperov01@mail.ru

**Aleksandr O. OVCHINNIKOV**, student of the Institute for Training of Management Personnel, 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:**

**Puzach S.V.** — *scientific management; research concept; methodology development; follow-on revision of the text; final conclusions.*

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

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

**Ovchinnikov A.O.** — *research concept; methodology development; follow-on revision of the text; final conclusions.*

*The authors declare no conflicts of interests.*

ПОЖАРОВЗРЫВБЕЗОПАСНОСТЬ/FIRE AND EXPLOSION SAFETY. 2025. Т. 34. № 4. С. 83–90  
 POZHAROVZRYVOBEZOPASNOST/FIRE AND EXPLOSION SAFETY. 2025; 34(4):83-90

УДК 614.84

<https://doi.org/10.22227/0869-7493.2025.34.04.83-90>

## Анализ токсичных выбросов и опасных факторов пожара при тепловом разгоне литий-ионных батарей

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 сведения об особенностях теплового разгона литий-ионных батарей (ЛИБ) различных типов и связанных с ним опасных факторов пожара. Выполнено обобщение данных по составу газообразных продуктов, выделяющихся при термическом разрушении компонентов ЛИБ с акцентом на повышенную токсичность угарного газа и фтороводорода. Проведен анализ экспериментальных концентраций данных веществ и их сопоставление с действующими нормативами (ПДК, IDLH, AEGL) с учетом объема помещений. Установлено, что даже одна ячейка ЛИБ может привести к превышению допустимых уровней СО и HF при недостаточной вентиляции. Даны рекомендации по включению специфических сценариев с участием ЛИБ в расчет пожарного риска и необходимости дополнительных исследований по моделированию их горения.

**Ключевые слова:** ячейка; модуль; газовыделение; моделирование пожара; предельно допустимая концентрация; помещение

**Для цитирования:** Харламенков А.С. Анализ токсичных выбросов и опасных факторов пожара при тепловом разгоне литий-ионных батарей // Пожаровзрывобезопасность/Fire and Explosion Safety. 2025. Т. 34. № 4. С. 83–90. DOI: 10.22227/0869-7493.2025.34.04.83-90

✉ Харламенков Александр Сергеевич, e-mail: h\_a\_s@live.ru

## Thermal runaway of lithium-ion batteries: analysis of toxic emissions and fire hazards

Aleksandr S. Kharlamenkov ✉

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

### ABSTRACT

The article addresses the Thermal runaway of various lithium-ion batteries (LIB) and related fire hazards. Information about the composition of gaseous products released during thermal destruction of LIB components was summarized with a focus on the extreme toxicity of carbon monoxide and hydrogen fluoride. Experimental concentrations of these substances were analyzed and matched against effective standards (Maximum Permissible Concentrations, IDLH, AEGL), taking into account the volume of premises. It is found that even one LIB cell can cause permissible levels of CO and HF to be exceeded if ventilation is insufficient. It is recommended to contribute specific scenarios, involving LIBs, to the fire risk analysis and conduct more research on combustion modeling.

**Keywords:** cell; module; gas release; fire modeling; maximum permissible concentration; premises

**For citation:** Kharlamenkov A.S. Thermal runaway of lithium-ion batteries: analysis of toxic emissions and fire hazards. *Pozharovzryvobezopasnost/Fire and Explosion Safety*. 2025; 34(4): 83-90. DOI: 10.22227/0869-7493.2025.34.04.83-90 (rus).

✉ Aleksandr Sergeevich Kharlamenkov, e-mail: h\_a\_s@live.ru

### ВОПРОС



Вопросы эффективного тушения и обеспечения безопасной эксплуатации литий-ионных батарей (ЛИБ) с каждым днем становятся все более актуальными. Глобальное внедрение ЛИБ в качестве малогабарит-

ных источников энергии требует от специалистов разработки новых организационных и технических мер по предупреждению и уменьшению последствий аварийной работы батарей на объектах защиты.

Значительное количество исследований пожарной опасности ЛИБ направлено на изучение процесса

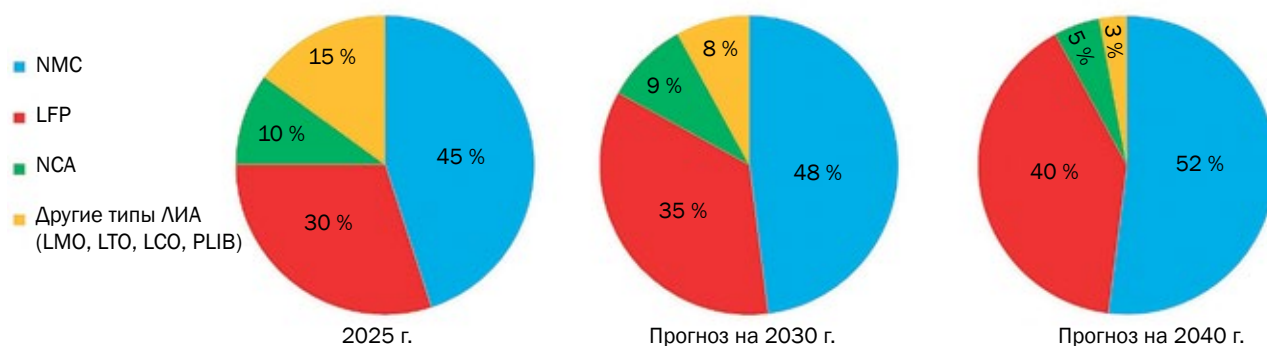


Рис. 1. Процентное распределение различных типов ЛИБ в мире

теплого разгона батарей различного химического состава. Основные типы ЛИБ: литий-кобальт-оксидные ( $\text{LiCoO}_2$ , LCO); литий-никель-марганец-кобальт-оксидные ( $\text{LiNiMnCoO}_2$ , NMC); литий-никель-кобальт-алюминий-оксидные ( $\text{LiNiCoAlO}_2$ , NCA); литий-титанатные ( $\text{Li}_4\text{Ti}_5\text{O}_{12}$ , LTO); литий-железо-фосфатные ( $\text{LiFePO}_4$ , LFP).

В 2024 г. мировой спрос на ЛИБ вырос до 950 ГВтч, что на 25 % больше, чем в 2023 г. Кроме того, спрос на никель и кобальт также вырос на 30 и 15 % соответственно<sup>1</sup>. Ожидается, что до 2030 г. сохранится высокий спрос на батареи типа NMC и их подвиды — NMC532, NMC622 и NMC811. В то же время значительно увеличивается производство и спрос на тип LFP как более пожаробезопасный [1, 2].

На рис. 1 представлено приблизительное процентное распределение основных типов ЛИБ, включая новые виды, находящиеся на стадии разработки (пост-литиевые батареи или PLIB).

Общая тенденция демонстрирует значительный рост спроса на ЛИБ, особенно в секторе электромобилей. Ведущие типы, такие как NMC и LFP, становятся все более популярными благодаря своим характеристикам и успешной практической эксплуатации. Прогнозы на будущее также предполагают масштабное увеличение рыночного объема и возможностей, что подчеркивает важность развития этого сектора в ответ на глобальные потребности в устойчивой энергетике.

В последние годы ведутся активные разработки и внедрение в эксплуатацию (помимо твердотельных ЛИБ) новых типов: литий-серные (Li-S); литий-воздушные/оксидные (Li-air, Li-O<sub>2</sub>); натрий-ионные (Na-ion); кремний-углеродные (Si-C). Главным преимуществом Li-S и Li-O<sub>2</sub> батарей является их дешевизна, более высокая емкость и плотность энергии (400–600 Втч/кг) по сравнению с другими типами ЛИБ (до 260 Втч/кг) [3]. Однако на практике такие батареи имеют ограниченный срок службы, малое число циклов перезарядки из-за наличия паразитных химических реакций в процессе его работы, с которыми пытаются бороться путем поиска новых, более совершенных конструкций электродов и состава электролита [4, 5].

В отличие от лития, натрий является более экологичным, дешевым и доступным металлом, но по причине меньшей плотности энергии (75–160 Втч/кг) по сравнению с LFP типом (120–260 Втч/кг) применение натрий-ионных батарей (НИБ) будет ограничено. В основном НИБ планируется использовать в качестве источников энергии для городских транспортных средств (электросамокаты и велосипеды, каршеринг), а также систем накопления и хранения энергии. Важным преимуществом НИБ является их пожаробезопасность, наравне с батареями типа LFP, а также конечная стоимость НИБ, сопоставимая с ценой NMC батареи [6].

В последние годы наблюдается активное внедрение кремний-углеродных (Si-C) анодов в ЛИБ, особенно для мобильных устройств. Такие аккумуляторы схожи по конструкции с традиционными Li-ion/Li-Pol типами, но отличаются материалом отрицательного электрода. Вместо графита здесь используется кремний-углеродный композит — углерод (80–90 %) и кремний (10–20 %). Последний выполняет стабилизацию структуры анода, так как чистый кремний при зарядке может расширяться до 300 %, а с «каркасом» из углерода — только до 15–60 % [7, 8]. Испытания ячеек с Si-C анодами (CATL, BYD и др.) показали, что при тепловом разгоне они воспламеняются позднее, чем традиционные Li-ion/Li-Pol (42 против 28 с), а температура их горения ниже (680 против 820 °C). При этом начало возгорания у таких ячеек происходит при более высокой температуре (172 °C по сравнению со 148 °C у графитовых анодов). Эти данные свидетельствуют о более высокой термической стабильности Si-C систем, хотя параметры горения зависят от конкретной конструкции аккумулятора. Данные показатели дают возможность повышения пожарной безопасности мобильных устройств за счет применения в их конструкции Si-C анодов. Это решение полностью не исключает риск возгорания такой батареи, так как в ней применяется аналогичный электролит (обычно  $\text{LiPF}_6$ ), который считается основным источником опасности [9].

Ведутся исследования по разработке новых типов самозатухающих сепараторов для ЛИБ типа LFP на основе полиимида (PIFAP), который представляет собой многослойную структуру из электросуперпроводящих (электропряденых) полиимидных волокон (PIF), покрытых композитным аэрогелем из полиимида и аммоний-полифосфата (APP) [10]. Комбинированный состав сепаратора обеспечивает значительное снижение

<sup>1</sup> Глобальный прогноз электромобилей (EV) на 2025 год // Официальный сайт Международного электротехнического агентства (IEA). URL: <https://www.iea.org/reports/global-ev-outlook-2025> (дата обращения: 22.06.2025).

тепловыделения из ячейки и подавление ее теплового разгона ЛИБ. В основном это происходит за счет структуры PIF, которая обладает высокой термической стабильностью и начинает разрушаться при температурах около 500 °С. Композитный гель APP обеспечивает более эффективное самозатухание сепаратора путем выделения при нагревании негорючих газообразных веществ (азота и воды) с образованием защитного слоя фосфатов, подавляющих горение и снижающих опасные выбросы фтороводорода (HF).

Большинство перечисленных выше нововведений в области разработки новых составов ЛИБ направлены на снижение их пожарной опасности за счет предотвращения или замедления теплового разгона при механических повреждениях, перенапряжении и перезаряде отдельных ячеек. При этом исследованиям по прогнозированию и определению значений параметров опасных факторов пожара (ОФП) с участием ЛИБ уделяется недостаточное внимание. В особенности это касается вопросов оценки опасности воздействия на человека токсичных продуктов горения в результате теплового разгона ЛИБ и его влияния на снижение концентрации кислорода и видимости на путях эвакуации.

Какие подходы к оценке значений параметров ОФП следует применять при анализе опасных сценариев пожара с участием ЛИБ?

## ОТВЕТ

На процесс развития пожара и изменения параметров его опасных факторов в значительной степени влияет тип, а также массовая и компонентная структура отдельных ячеек ЛИБ. Стандартная ячейка состоит из следующих компонентов [11]:

- катод — это основной источник энергии, в котором используются материалы на основе литий-металлических оксидов (NMC, NCA и др.) или литий-железофосфата (LFP);
- анод, выполненный чаще всего из графита (иногда с добавлением не более 10 % кремния), который участвует в процессе интеркаляции (встраивания в свою слоистую структуру) ионов лития;
- электролит, представляющий собой раствор литиевых солей ( $\text{LiPF}_6$ ) в органических карбонатах, таких как диметилкарбонат (DMC), этилкарбонат (EC) или диэтилкарбонат (DEC);

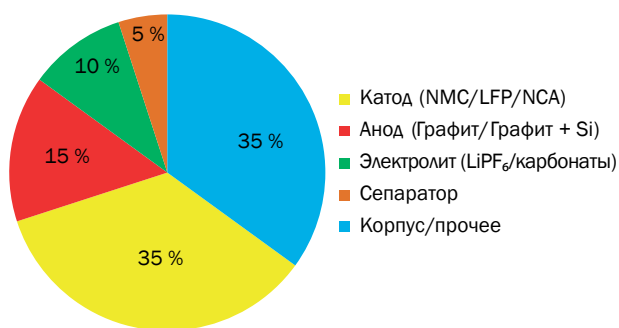


Рис. 2. Усредненное процентное распределение массовых долей отдельных компонентов ЛИБ

- сепаратор — это полимерные мембраны (например, полиэтилен или полипропилен), предотвращающие прямой контакт анода и катода, исключающий возникновение короткого замыкания;
- корпус, выполняющий роль защитной оболочки, обычно выполненный из металла (сталь, алюминий) с добавлением полимеров (обычно полиэтилентерефталат и полипропилен — около 15–25 % от массы всего корпуса).

Усредненные массовые доли отдельных компонентов для ЛИБ с различными типами катодов представлены на рис. 2. Процентное соотношение масс компонентов ЛИБ может незначительно отличаться в зависимости от типа ячеек (цилиндрическая, призматическая, пакет), а также от химического состава катода и электролита.

Тепловой разгон для большинства типов ЛИБ сопровождается запуском активных химических реакций, протекающих как в самом электролите, так и между ним и материалами катода и анода. Как отмечалось выше, основу химического состава электролита ЛИБ (около 85 %) составляют органические карбонаты, которые относятся к легковоспламеняющимся и горючим жидкостям (ЛВЖ и ГЖ), остальную массу составляют растворенные соли гексафторфосфата лития ( $\text{LiPF}_6$ ). Катоды в литий-ионных батареях могут значительно различаться в зависимости от типа ЛИБ, что будет существенно влиять на качественный и количественный состав газообразных продуктов термического разложения, а также на концентрацию отдельных токсичных компонентов. В табл. 1 представлено

Таблица 1. Химический состав активных материалов катода ЛИБ

| Тип катода | Масса активных материалов катода, % |      |      |      |      |      |     |      |
|------------|-------------------------------------|------|------|------|------|------|-----|------|
|            | Li                                  | Ni   | Mn   | Co   | Fe   | P    | Al  | O    |
| NMC111     | 7,2                                 | 20,2 | 18,9 | 20,3 | -    | -    | -   | 33,4 |
| NMC532     |                                     | 30,4 | 17,1 | 12,2 | -    | -    | -   | 33,1 |
| NMC622     |                                     | 36   | 11,1 | 11,9 | -    | -    | -   | 33,8 |
| NMC811     |                                     | 48   | 5,9  | 5,9  | -    | -    | -   | 33   |
| NCA        | 7,3                                 | 48,4 | -    | 9,3  | -    | -    | 1,4 | 33,6 |
| LCO        | 7,1                                 | -    | -    | 60,2 | -    | -    | -   | 32,7 |
| LFP        | 4,4                                 | -    | -    | -    | 35,4 | 19,6 | -   | 40,6 |

распределение массовых долей активных материалов катода различных типов ЛИБ.

Как видно из табл. 1, массовая доля лития в катодах на основе NMC, NCA и LCO составляет около 7,1–7,3 %, тогда как в LFP она значительно ниже (4,4 %). Это различие связано с тем, что в катодах LFP на один атом лития приходится четыре атома кислорода, в то время как в слоистых оксидах (NMC, NCA, LCO) аналогичное соотношение составляет 1:2.

Для всех типов катодов следует отметить высокое содержание кислорода (30–40 % массы), что имеет принципиальное значение для процессов термического разложения. Выделяющийся кислород, взаимодействуя с электролитом, способствует развитию горения с образованием различных газообразных продуктов. Катоды NMC811 и NCA с высоким содержанием никеля менее термически стабильны и при разложении выделяют больше кислорода, что усиливает реакции с электролитом и увеличивает риск возгорания (начало разложения при 170–195 °C с максимумом 450–850 °C [12–15]). LFP катоды благодаря своей кристаллической (оливиновой) структуре обладают более высокой термической стабильностью. Фосфатная группа (PO<sub>4</sub><sup>3-</sup>) LFP катода удерживает кислород прочнее, что снижает интенсивность его выделения и, как следствие, уменьшает пожарную опасность (начало термического разложения при 190–200 °C с максимумом 240–400 °C [12–15]).

В табл. 2 представлено распределение массовых долей активных материалов анода различных ЛИБ.

Представленная таблица иллюстрирует преобладание графитовых анодов (около 95 % рынка) в современных литий-ионных батареях, что объясняется их высокой циклической стабильностью, приемлемой стоимостью и удельной емкостью.

Добавление кремния в анодные материалы повышает теоретическую емкость, но сопровождается существенным объемным расширением, что ускоряет деградацию структуры и снижает срок службы. С точки зрения термической безопасности, кремнийсодержащие аноды могут усугублять тепловой разгон. При высоких температурах кремний способствует разрушению SEI-слоя (твердая межфазная пленка на поверхности анода) и усиленному взаимодействию с электролитом, что увеличивает объем выделяемых горючих газов (включая

углеводороды). Альтернативой являются аноды на основе литий-титаната (LTO), обеспечивающие повышенную термостабильность за счет отсутствия SEI-слоя и незначительного объемного расширения, хотя и уступающие в энергетической плотности. Таким образом, выбор анодного материала представляет собой компромисс между энергетическими характеристиками и термической безопасностью ячейки ЛИБ.

Чистый кремний и металлический литий пока не используются в массовом производстве из-за проблем со стабильностью и безопасностью анодов при их циклической перезарядке, приводящей к значительному расширению кремния в процессе интеркаляции лития и образования дендритов, повреждающих сепаратор (в анодах с металлическим литием).

Исследования теплового разгона ЛИБ показали, что наибольшую пожарную опасность представляют элементы, находящиеся в полностью заряженном состоянии или в процессе подзарядки. С увеличением уровня заряда (SoC) возрастает вероятность и интенсивность химических реакций в случае теплового разгона, а также увеличение тепловыделения и объема газовых выбросов [16–18]. Для цилиндрических ячеек типоразмера 18650 с катодами на основе LCO, NMC и LFP при уровне заряда 50–100 % зарегистрированы две характерные фазы теплового разгона, сопровождающиеся вскрытием предохранительного клапана (этап 1) и разрушением корпуса ячейки (этап 2). Начало теплового разгона зафиксировано при температуре, превышающей температуру размягчения сепаратора (100–130 °C), а вскрытие клапана – в интервале 130–145 °C.

Далее, в зависимости от типа катода, развивается одна или две активные стадии термодеструкции. На первом этапе (при температуре около 170 °C) происходит первоначальный выброс горючих газов и пламени, сопровождаемый ускорением роста температуры ячейки. Второй, более активный этап, фиксируется при температурах 230–250 °C для LFP, 250–290 °C для NMC и 260–310 °C для LCO типов [16–18]. Этап характеризуется взрывоподобным горением или интенсивным факельным выбросом (за исключением LFP, где процесс развивается более стабильно), а также разрушением корпуса с выбросом металлической фольги токосъемников. В от-

Таблица 2. Химический состав активных материалов анода ЛИБ

| Тип анода             | Масса активных материалов анода, мас. % |       |      |      |      |
|-----------------------|---|-------|------|------|------|
|                       | Li                                      | C     | Si   | Ti   | O    |
| Графит (C)            | -                                       | 100   | -    | -    | -    |
| Кремний-графит (Si-C) | -                                       | 89–95 | 5–11 | -    | -    |
| Чистый кремний (Si)   | -                                       | -     | 100  | -    | -    |
| Литий-титанат (LTO)   | 6,1                                     | -     | -    | 52,1 | 41,8 |
| Металлический литий   | 100                                     | -     | -    | -    | -    |

Таблица 3. Молярные доли газов при тепловом разгоне ЛИБ

| Тип<br>ЛИБ | Молярные доли газов, %        |      |                 |      |         |      |                 |     |                               |     |                               |     |           |     |
|------------|-------------------------------|------|-----------------|------|---------|------|-----------------|-----|-------------------------------|-----|-------------------------------|-----|-----------|-----|
|            | H <sub>2</sub>                |      | CO <sub>2</sub> |      | CO      |      | CH <sub>4</sub> |     | C <sub>2</sub> H <sub>4</sub> |     | C <sub>2</sub> H <sub>6</sub> |     | HF        |     |
|            | Номер этапа теплового разгона |      |                 |      |         |      |                 |     |                               |     |                               |     |           |     |
|            | 1                             | 2    | 1               | 2    | 1       | 2    | 1               | 2   | 1                             | 2   | 1                             | 2   | 1         | 2   |
| LFP        | 25–35                         | 30,9 | 20–25           | 53,0 | Менее 5 | 4,8  | –               | 4,1 | –                             | 6,8 | –                             | 0,3 | Менее 0,1 | 0,3 |
| NMC        | 25–30                         | 30,8 | 15–20           | 41,2 | 10–15   | 13,0 | –               | 6,8 | –                             | 8,2 | –                             | –   | 0,5–1,0   | 1,2 |
| LCO        | 20–30                         | 30,0 | 15–25           | 25,0 | 10–20   | 27,6 | –               | 8,6 | –                             | 7,7 | –                             | 1,2 | 0,5–1,5   | 2,0 |

дельных исследованиях разлет частиц металла электродов NMC ячейки достигал 6 м [19].

С точки зрения оценки ОФП, горение ЛИБ сопровождается выделением большого количества токсичных газов (CO, CO<sub>2</sub>, HF, SO<sub>2</sub>, NO<sub>2</sub>, NO, HCl и H<sub>x</sub>C<sub>y</sub>) и мелкодисперсных частиц (PM – аэрозоли с размерами от 0,1–10 мкм) [20, 21]. Входящие в состав электролита ЛВЖ и ГЖ представляют основную пожарную опасность. При тепловом разгоне ЛИБ и разложении карбонатных растворителей (например, EC, DMC) происходит выделение углекислого (CO<sub>2</sub>) и угарного (CO) газов, водорода (H<sub>2</sub>) и углеводородов, таких как этилен (C<sub>2</sub>H<sub>4</sub>) и метан (CH<sub>4</sub>) [20].

Кроме того, разложение LiPF<sub>6</sub> приводит к образованию плавиковой кислоты (HF) – высокотоксичного соединения, представляющего серьезную опасность для человека. Этот процесс особенно характерен для LFP типов ЛИБ ввиду их склонности к сохранению LiPF<sub>6</sub> в более стабильной форме до высоких температур (до 150 °C). При 150–270 °C происходит деструкция LiPF<sub>6</sub> с образованием HF и фторфосфорных соединений (PF<sub>5</sub>, POF<sub>3</sub>). Наличие высокой влажности (в том числе при тушении ЛИБ водой) способствует значительному увеличению количества HF [22, 23]. Соединения PF<sub>5</sub> и POF<sub>3</sub> в атмосфере также активно вступают в реакции с влагой (гидролизуются), превращаясь в HF и ортофосфорную кислоту (H<sub>3</sub>PO<sub>4</sub>), что способствует дополнительному накоплению HF и создает высокую токсикологическую опасность. При горении ЛИБ ортофосфорная кислота образуется в незначительных количествах и не представляет серьезной опасности для человека (обычно может вызывать небольшие раздражения слизистых оболочек и дыхательных путей).

В табл. 3 представлены молярные доли газов при тепловом разгоне ЛИБ на представленных выше этапах 1 и 2 [13, 22–24].

Анализ газовых выбросов, сопровождающих тепловой разгон различных типов ЛИБ, показывает устойчивую тенденцию к преобладанию H<sub>2</sub> и CO<sub>2</sub> среди выделяющихся газов. В частности, для всех типов катодов массовая доля H<sub>2</sub> составляет около 30 %, а CO<sub>2</sub> – 25–53 %, при этом у аккумуляторов с катодом типа LFP наблюдается наибольшая доля CO<sub>2</sub> и наименьшее количество CO, что свидетельствует о более полном окислении органических компонентов.

Концентрации CO<sub>2</sub> [13, 23, 24] могут достигать 20 000–120 000 ppm (36 000–216 000 мг/м<sup>3</sup>), что может превысить порог максимально разовой предельно допустимой концентрации CO<sub>2</sub> в воздухе рабочей зоны (ПДК<sub>м.р.</sub>), который составляет 27 000 мг/м<sup>3</sup> (по данным табл. 2.1 СанПин 1.2.3685–21<sup>2</sup>). Поэтому высокие концентрации CO<sub>2</sub> при горении ЛИБ представляют опасность, особенно в плохोпрветриваемых помещениях малого объема. В Методике определения расчетных величин пожарного риска<sup>3</sup> (далее Методика ОФП) тоже присутствует предельно допустимое значение CO<sub>2</sub> (110 000 мг/м<sup>3</sup>), которое также может быть превышено предельными концентрациями при горении ЛИБ.

Угарный газ составляет значительную долю (до 27,6 %) в выбросах батарей с катодами типа LCO и NMC, повышая токсикологический риск при локальных пожарах. Исследования [13, 23, 24] показали, что концентрации CO на различных этапах теплового разгона ЛИБ варьируются в диапазоне 1000–56 000 ppm (1145–64 120 мг/м<sup>3</sup>) и значительно превышают значение ПДК<sub>м.р.</sub> = 20 мг/м<sup>3</sup>. Это подтверждает высокую токсичность CO в условиях пожара ЛИБ и указывает на необходимость принятия дополнительных мер защиты людей. В Методике ОФП<sup>3</sup> предельно допустимая концентрация CO составляет 1160 мг/м<sup>3</sup>, которая тоже может быть достигнута при горении ячейки ЛИБ, особенно при одновременном выбросе газа из нескольких ячеек в составе модуля.

Углеводороды (метан, этилен и др.) присутствуют во всех типах ЛИБ, но в меньших количествах (до 8 %), формируясь за счет термического разложения растворителей и побочных органических соединений, и в основном представляют пожарную опасность из-за возможного образования горючих смесей и последующего их воспламенения (выделение H<sub>2</sub> также способствует этому).

Несмотря на сравнительно низкое содержание (0,3–2,0 %), HF представляет особую опасность и обладает высокой токсичностью даже при кратковременном воздействии

<sup>2</sup> Об утверждении санитарных правил и норм СанПин 1.2.3685–21. Гигиенические нормативы и требования к обеспечению безопасности и (или) безвредности для человека факторов среды обитания : Постановление Главного государственного санитарного врача РФ от 28.01.2021 № 2 (с изм. на 30.12.2022).

<sup>3</sup> Об утверждении методики определения расчетных величин пожарного риска в зданиях, сооружениях и пожарных отсеках различных классов функциональной пожарной опасности : Приказ МЧС России от 14.11.2022 № 1140.

Таблица 4. Экспериментальные и нормативные значения концентраций HF для ЛИБ

| Показатель   | Единицы измерения | CO <sub>2</sub> | CO          | HF       |
|--|-------------------|-----------------|-------------|----------|
| Концентрация по экспериментальным данным             | ppm               | 20 000–120 000  | 1000–56 000 | 20–200   |
|  | мг/м <sup>3</sup> | 36 000–216 000  | 1145–64 120 | 16,4–164 |
| ПДК <sub>м.р</sub> (СанПин 1.2.3685–21) <sup>2</sup> | ppm               | 15 000          | 17,46       | 0,61     |
|  | мг/м <sup>3</sup> | 27 000          | 20          | 0,5      |
| ПДК (Методика ОФП) <sup>3</sup>                      | ppm               | 61 111          | 1012        | –        |
|  | мг/м <sup>3</sup> | 110 000         | 1160        | –        |
| IDLH*  | ppm               | 40 000          | 1200        | 30       |
|  | мг/м <sup>3</sup> | 72 000          | 1374        | 24,6     |
| STEL**   | ppm               | 30 000          | 200         | 3        |
|  | мг/м <sup>3</sup> | 54 000          | 229         | 2,46     |
| AEGL-2***  | ppm               | –               | 420         | 95       |
|  | мг/м <sup>3</sup> | –               | 481         | 77,7     |
| AEGL-3***  | ppm               | –               | 1700        | 170      |
|  | мг/м <sup>3</sup> | –               | 1948        | 139,1    |

\* IDLH – Immediately Dangerous to Life or Health (NIOSH, США), концентрация, опасная при 30 мин воздействия.

\*\* STEL – Short-Term Exposure Limit (ACGIH и OSHA, США) – это предельно допустимая концентрация вещества в воздухе рабочей зоны, при которой допускается кратковременное (не более 15 мин) воздействие на персонал.

\*\*\* AEGL-2/AEGL-3 – Acute Exposure Guideline Level, рассчитанные для 10 мин (EPA, США):

- AEGL-2: вызывает тяжелые, но не смертельные последствия, мешающие эвакуации;
- AEGL-3: вызывает необратимые последствия или смерть.

на человека. В ряде экспериментов [23–25] регистрировались концентрации HF от 2 до 200 ppm. Для единичной цилиндрической ячейки NMC 18650 максимальная концентрация HF достигала 66 ppm ( $\approx 54$  мг/м<sup>3</sup> при 25 °C и 1 атм). Это значение более чем в 100 раз превышает порог ПДК<sub>м.р</sub> = 0,5 мг/м<sup>3</sup> и в 2 раза уровень международного кратковременного порога немедленной опасности для жизни и здоровья (IDLH<sup>4</sup>), который составляет 30 ppm ( $\approx 24,6$  мг/м<sup>3</sup>). Следует отметить, что при возгорании батарейной сборки, состоящей из нескольких литий-ионных ячеек в условиях ограниченного воздухообмена, фиксировались значения концентрации HF 76–100 ppm ( $\approx 81,84$  мг/м<sup>3</sup>) [23–25], что указывает на возможное превышение порога жизнеугрожающего острого воздействия (AEGL-3<sup>5</sup>), который для HF составляет 170 ppm  $\approx 139,1$  мг/м<sup>3</sup>.

<sup>4</sup> Национальный институт охраны труда США (NIOSH). Documentation for Immediately Dangerous to Life or Health (IDLH) Values – Hydrogen Fluoride. National Institute for Occupational Safety and Health (NIOSH), 1994 (rev. 2013). URL: <https://www.cdc.gov/niosh/idlh/7664393.html> (дата обращения: 10.07.2025).

<sup>5</sup> Агентство по охране окружающей среды США (EPA). Acute Exposure Guideline Levels for Selected Airborne Chemicals. Vol. 5 (Hydrogen Fluoride). 2003. Washington, DC: National Research Council. URL: <https://www.epa.gov/aegl/hydrogen-fluoride-results-aegl-program> (дата обращения: 10.07.2025).

Обобщенные данные по предельно допустимым концентрациям CO<sub>2</sub>, CO и HF для различных типов ЛИБ (NMC, LFP и LCO) представлены в табл. 4.

Следует отметить, что прямое сравнение полученных концентраций газов при горении ЛИБ с нормативными значениями ПДК является некорректным, так как экспериментальные значения характеризуют в большей степени опасность вблизи источника выброса газов, а не опасную концентрацию во всем объеме помещения. Поэтому для практических целей следует использовать значения массы выброшенного из горящей ячейки газа (в мг) и далее, при известном объеме помещения, определять среднеобъемную концентрацию газа, которую можно сопоставить с нормами ПДК. Например, исследование выбросов HF [23] указывает, что объем выброса HF может составлять 20–200 мг/Втч, что для одной ячейки емкостью 3500 мА/ч с номинальным напряжением 3,7 В (12,95 Втч) составит массу выбросов HF от 259 до 2590 мг. Тогда при известном объеме помещения (например, 27 м<sup>3</sup> с размерами 3 × 3 × 3 м) концентрация HF может составить 9,6–96 мг/м<sup>3</sup>, что указывает на превышение большинства нормативных ПДК. Аналогичным образом можно оценить среднеобъемные концентрации и опасность выбросов CO и CO<sub>2</sub> для различных типов батарей.

Особенности термического разгона и опасность выделения CO<sub>2</sub>, CO и HF актуальны не только для промышленных объектов с централизованными местами размещения ЛИБ (например, центры обработки данных, системы

накопления электрической энергии и т.д.), но и для иных объектов (жилые и общественные здания, больницы, торговые центры, магазины электроники, офисы и т.п.), где возможно наличие аккумуляторных сборок в составе устройств повседневного использования (источники бесперебойного питания, повербанки, аккумуляторный рабочий инструмент, электросамокаты и т.д.). Накопление газов в таких помещениях при загорании нескольких ячеек ЛИБ способно создать опасную обстановку уже на ранней стадии без видимого пламени.

В связи с этим при оценке ОФП при тепловом разгоне ЛИБ требуется:

- дополнительно учитывать сценарии с выделением HF при оценке времени наступления ОФП, так как пожары с участием ЛИБ имеют определенную специфику

по составу продуктов горения, отличных от стандартных (CO, CO<sub>2</sub>, углеводороды);

- предусматривать газоаналитический контроль, проектирование аварийной вентиляции (при необходимости), а также применение противопожарных полотен и средств индивидуальной защиты органов дыхания при тушении пожаров и эвакуации людей;
- проводить дополнительные экспериментальные исследования и разработку моделей для количественной оценки накопления CO<sub>2</sub>, CO и HF, а также методик, описывающих поведение батарейных сборок с разными типами и видами ячеек ЛИБ в условиях теплового разгона.

Комплексный подход к анализу и моделированию таких ситуаций позволит повысить пожарную безопасность на объектах с наличием ЛИБ.

### СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Mossali E., Picone N., Gentilini L., Rodriguez O., Pérez J.M., Colledani M. Lithium-ion batteries towards circular economy : a literature review of opportunities and issues of recycling treatments // *Journal of Environmental Management*. 2020. No. 264. P. 110500. DOI: 10.1016/j.jenvman.2020.110500
2. Itani K., De Bernardinis A. Review on New-Generation Batteries Technologies: Trends and Future Directions // *Energies*. 2023. No. 16 (22). P. 7530. DOI: 10.3390/en16227530. EDN QBBJWT.
3. Guo R., Yang Y., Huang X.L., Zhao Ch., Hu.B., Hou. F. et al. Recent Advances in Multifunctional Binders for High Sulfur Loading Lithium-Sulfur Batteries // *Advanced Functional Materials*. 2023. No. 34 (1). DOI: 10.1002/adfm.202307108.EDNHDDVON.
4. Lee B.-J., Zhao Ch., Yu J.-H., Kang T.-H., Park H.-Y. Kang. J. et al. Development of high-energy non-aqueous lithium-sulfur batteries via redox-active interlayer strategy // *Nature Communications*. 2022. No. 13 (4629). DOI: 10.1038/s41467-022-31943-8
5. Mahne N., Fontaine O., Thotiyil M.O., Wilkening M., Freunberger A.A. Mechanism and performance of lithium-oxygen batteries – a perspective // *Chemical Science*. 2017. No. 8 (10). Pp. 6716–6729. DOI: 10.1039/C7SC02519J
6. Ferraro M., Tumminia G. Techno-economics Analysis on Sodium-Ion Batteries: Overview and Prospective // *Emerging Battery Technologies to Boost the Clean Energy Transition*. 2024. Pp. 259–266. DOI: 10.1007/978-3-031-48359-2\_14
7. Andersen H.F., Foss C.E. L., Voje J., Tronstad R., Mokkelbost T., Vullum P.E. et al. Silicon-Carbon composite anodes from industrial battery grade silicon // *Scientific Reports*. 2019. No. 9 (14814). DOI: 10.1038/s41598-019-51324-4
8. Liu X., Zhu X., Pan D. Solutions for the problems of silicon-carbon anode materials for lithium-ion batteries // *Royal Society Open Science*. 2018. No. 5 (6). P. 172370. DOI: 10.1098/rsos.172370
9. Liu Y., Shao R., Jiang R., Song X., Jin Zh., Sun L. A review of existing and emerging binders for silicon anodic Li-ion batteries // *Nano Research*. 2023. No. 16 (5). Pp. 6736–6752. DOI: 10.1007/s12274-022-5281-7. EDN FBREOD.
10. Zhou K., Fang Y., Bao M., Fan W., Ren J., He P. et al. Self-Extinguishing Polyimide Sandwiched Separators for High-Safety and Fast Charging Lithium Metal Batteries // *Journal of Power Sources*. 2024. No. 610. P. 234734. DOI: 10.1016/j.jpowsour.2024.234734. EDN FXLSHU.
11. Скундин А.М., Кулова Т.Л., Григорьева О.Ю. Литий-ионные аккумуляторы : учебное пособие. М. : Издательство МЭИ, 2022. 99 с.
12. Chen Y., Kang Y., Zhao Y., Wang L., Liu J., Li Y. et al. A review of lithium-ion battery safety concerns: The issues, strategies, and testing standards // *Journal of Energy Chemistry*. 2020. No. 59. Pp. 83–89. DOI: 10.1016/j.jchem.2020.10.017. EDN DVVEBL.
13. Golubkov A.W., Fuchs D., Wagner J., Wiltsche H., Stangl Ch., Fauler G. Thermal-runaway experiments on consumer Li-ion batteries with metal-oxide and olivin-type cathodes // *RSC Advances*. 2014. No. 4 (7). Pp. 3633–3642. DOI: 10.1039/C3RA45748F
14. Qi Ch., Wang H., Li M., Li Ch., Li Y., Shi Ch. et al. Research on the Thermal Runaway Behavior and Flammability Limits of Sodium-Ion and Lithium-Ion Batteries // *Batteries*. 2025. No. 11 (1). P. 24. DOI: 10.3390/batteries11010024. EDN WXMKZO.

15. Yuan Y., Ma Q., Zhang X., Zhang F., Song X., Xin H. Influence of cathode materials on thermal characteristics of lithium-ion batteries // *Frontiers in Chemistry*. 2024. No. 12. P. 13248440. DOI: 10.3389/fchem.2024.1324840. EDN HBTTF0.
16. Ribière P., Grugeon S., Morcrette M., Boyanov S., Laruelle, S., Marlair G. Investigation on the fire-induced hazards of Li-ion battery cells by fire calorimetry // *Energy & Environmental Science*. 2012. No. 5 (1). Pp. 5271–5280. DOI: 10.1039/C1EE02218K
17. Chen M., Zhou D., Chen X., Zhang W., Liu J. Yuen R. et al. Investigation on the thermal hazards of 18650 lithium ion batteries by fire calorimeter // *Journal of Thermal Analysis and Calorimetry*. 2015. No. 122. Pp. 755–763. DOI: 10.1007/s10973-015-4751-5
18. Mazzaro M., Russo P., Longobardo G., Di Bari C., Cancelliere P. Fire Behaviour of NMC Li-ion Battery Cells // *Proceedings of the Ninth International Seminar on Fire and Explosion Hazards*. Saint Petersburg, 2019. No. 2. Pp. 881–890. DOI: 10.18720/spbpu/2/k19-136
19. Мокряк А.В., Мокряк А.Ю., Мельник А.А. Анализ остатков литий-ионных аккумуляторов после теплового разгона методом сканирующей электронной микроскопии // *Международный научно-исследовательский журнал*. 2023. № 4 (130). С. 1–9. DOI: 10.23670/IRJ.2023.130.63. EDN RHSTQD.
20. Claassen M., Bingham B., Chow J.C., Watson J.G., Wang Y., Wang X. Characterization of Lithium-Ion Battery Fire Emissions. Part 1: Chemical Composition of Fine Particles (PM<sub>2.5</sub>) // *Batteries*. 2024. No. 10 (9). P. 301. DOI: 10.3390/batteries10090301. EDN AHMGFL.
21. Claassen M., Bingham B., Chow J.C., Watson J.G., Wang Y., Wang X. Characterization of Lithium-Ion Battery Fire Emissions. Part 2: Particle Size Distributions and Emission Factors // *Batteries*. 2024. No. 10 (10). P. 366. DOI: 10.3390/batteries10100366. EDN KLNQHV.
22. Han J.Y., Jung S. Thermal Stability and the Effect of Water on Hydrogen Fluoride Generation in Lithium-Ion Battery Electrolytes Containing LiPF<sub>6</sub> // *Batteries*. 2022. No. 8 (7). P. 61. DOI: 10.3390/batteries8070061. EDN ONJDBE.
23. Larsson F., Andersson P., Blomqvist P., Mellander B.-E. Toxic fluoride gas emissions from lithium-ion battery fires // *Scientific Reports*. 2017. No. 7 (1). Pp. 1–13. DOI: 10.1038/s41598-017-09784-z. EDN MCPGWD.
24. Teng Zh., Lv Ch. Detection toward early-stage Thermal runaway gases of Li-ion battery by semiconductor sensor // *Frontiers in Chemistry*. 2025. No. 13. DOI: 10.3389/fchem.2025.1586903
25. Tschirschwitz R., Bernardy Ch. Harmful effects of lithium-ion battery Thermal runaway: scale-up tests from cell to second-life modules // *RSC Advances*. 2023. No. 13 (30). Pp. 20761–20779. DOI: 10.1039/d3ra02881j. EDN VXTQDC.

Материал поступил в редакцию 04.08.2025

Received August 04, 2025

### 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 RSCI: 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](mailto: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](http://www.fire-smi.ru).

Материал статьи должен излагаться в следующем порядке.

**2.1.** Номер УДК (универсальная десятичная классификация).

**2.2.** Заглавие статьи (на русском и английском языках). Заглавия научных статей должны быть точными и лаконичными и в то же время достаточно информативными; в них можно использовать только общепринятые сокращения. В переводе заглавий статей на английский язык недопустима транслитерация с русского языка, кроме неперебиваемых названий собственных имен, приборов и других объектов, имеющих собственные названия, а также неперебиваемый сленг, известный только русскоговорящим специалистам. Это касается также аннотаций, авторских резюме и ключевых слов.

**2.3.** Информация об авторах.

**2.3.1.** Имена, отчества и фамилии всех авторов. Они должны приводиться полностью на русском языке и в транслитерации в соответствии с системой, которая в настоящее время является наиболее распространенной (<http://fotosav.ru/services/transliteration.aspx>).

Авторами являются лица, принимавшие участие во всей работе или в ее главных разделах. Лица, участвовавшие в работе частично, указываются в сносках.

**2.3.2.** Ученые степени, звания, должность, место работы всех авторов с полным юридическим адресом (на русском и английском языках). Здесь необходимо указать: полное официальное название организации, страну, индекс, город, название улицы, номер дома,

а также контактные телефоны и электронные адреса всех авторов; дать информацию о контактном лице. Обращаем Ваше внимание, что при переводе необходимо указывать официально принятое название организации на английском языке. Все почтовые сведения (кроме наименования улицы, которое должно быть в транслитерированном виде) должны быть также переведены на английский язык, в том числе название города и страны.

Пример: *Institute for Problem in Mechanics, Russian Academy of Sciences (Vernadskogo Avenue, 101, Moscow, 119526, Russian Federation).*

**2.3.3.** ORCID, Researcher ID, Scopus Author ID.

**2.4.** Расширенное резюме на русском и английском языках. Необходимо иметь в виду, что авторское резюме на английском языке в русскоязычном издании является для иностранных ученых и специалистов основным и, как правило, единственным источником информации о содержании статьи и об изложенных в ней результатах исследований. Поэтому авторское резюме должно быть:

- информативным (не содержать общих слов);
- содержательным (должно отражать существенные результаты работы; не должно включать материал, который отсутствует в основной части публикации);
- структурированным (т.е. следовать логике описания результатов в публикации);
- грамотным (написанным качественным английским языком, без использования программ автоматизированного перевода);
- объемом не менее 200–250 слов.

Структура резюме должна повторять структуру статьи и включать четко обозначенные подразделы Введение (Introduction), Цели и задачи (Aims and Purposes), Методы (Methods), Результаты (Results), Обсуждение (Discussion), Заключение (выводы) (Conclusions).

Результаты работы следует описывать предельно точно и информативно. При этом должны приводиться основные теоретические и экспериментальные результаты, фактические данные, установленные взаимосвязи и закономерности.

Выводы могут сопровождаться рекомендациями, оценками, предложениями, гипотезами, описанными в работе.

Текст должен быть связным; излагаемые положения должны логично вытекать одно из другого.

Сокращения и условные обозначения, кроме общеупотребительных, следует применять в исключительных случаях или давать их расшифровку и определение при первом упоминании в тексте резюме.

В авторское резюме не следует включать схемы, таблицы, иллюстрации, формулы, а также ссылки на публикации, приведенные в списке литературы к статье.

Для повышения эффективности при онлайн-поиске включите в текст аннотации ключевые слова и термины из основного текста и заглавия статьи.

**2.5.** Ключевые слова на русском и английском языках (не менее 5 слов или коротких словосочетаний). Они указываются через точку с запятой. Недопустимо в качестве ключевых слов использовать термины общего характера (например, проблема, решение и т.п.), не являющиеся специфической характеристикой публикации. Используемые в заголовке слова и термины не нужно повторять в качестве ключевых слов: ключевые слова должны дополнять информацию в заголовке. При переводе ключевых слов на английский язык избегайте по возможности употребления слов «and» (и), «of» (предлог, указывающий на принадлежность), артиклей «a», «the» и т.п.

**2.6.** Основной текст статьи должен быть набран через 1,5 интервала в формате Word. Формулы должны быть набраны в Microsoft Equation или MathType.

Цитируемый текст из других публикаций следует брать в кавычки. Таблицы, рисунки, методы, численные данные (за исключением общеизвестных величин), опубликованные ранее, должны сопровождаться ссылками.

Если представленные в статье исследования выполнены авторами при финансовой поддержке Российского фонда фундаментальных исследований, Российского научного фонда, Министерства образования и науки Российской Федерации и т.п., то в конце статьи обязательно следует дать информацию об этом с указанием номера и названия гранта (научного проекта, госконтракта и т.д.).

Сокращения и условные обозначения физических величин в тексте статьи должны соответствовать действующим международным стандартам. Формулы и буквенные обозначения должны быть четкими и ясными. Все буквенные обозначения, входящие в формулы, должны быть расшифрованы с указанием единиц измерения. Размерность всех характеристик должна соответствовать системе СИ. Иллюстрации в электронной версии прилагаются отдельно. Фотографии должны быть сделаны с хорошего негатива контрастной печатью (файлы растровых изображений предоставляются с разрешением не менее 300 dpi, черно-белая штриховая графика — 600 dpi). Файлы векторной графики следует предоставлять в формате той программы, в которой они созданы, либо печатать PDF-файл из этой программы. Все иллюстрации должны иметь сквозную нумерацию. Чертежи и карты в качестве иллюстраций неприемлемы. Ссылки на все рисунки в тексте обязательны.

Таблицы должны быть составлены лаконично и содержать только необходимые сведения; однотипные таблицы следует строить одинаково. Цифровые данные необходимо округлять в соответствии с точностью эксперимента. Сведения в таблицах и на рисунках не должны повторяться. Ссылки на все таблицы в тексте обязательны.

В журнале предусматривается двуязычное представление табличного и графического материала, поэтому необходимо прислать перевод на английский язык:

- для таблицы: ее названия, шапки, боковика, текста во всех строках, сноска и примечаний;
- для рисунка: подписанной подписи и всех текстовых надписей на самом рисунке;
- для схемы: подписи к ней и всего содержания самой схемы.

### 2.7. Пристайные списки литературы на русском языке и языке оригинала (если книга переводная).

Список литературы должен включать библиографические сведения обо всех публикациях, упоминаемых в статье, и не должен содержать указаний на работы, на которые в тексте нет ссылок. Литература должна быть оформлена в виде общего списка в порядке упоминания. В тексте ссылка на литературу отмечается порядковой цифрой в квадратных скобках, например [1]. Библиографические данные приводятся по титульному листу издания. Порядок изложения элементов библиографического описания определяется требованиями ГОСТ 7.1-2003 и ГОСТ Р 7.0.5-2008.

В описании источников необходимо указывать всех авторов.

Наряду с этим для научных статей список литературы должен отвечать следующим требованиям.

Список литературы должен содержать не менее 20 источников (в это число не входят нормативные документы, патенты, ссылки на сайты компаний и т.п.). При этом количество ссылок на статьи из иностранных научных журналов и другие иностранные источники должно быть не менее 40 % от общего количества ссылок. Не более половины от оставшихся 60 % должны составлять статьи из русскоязычных научных журналов, остальное — другие первоисточники на русском языке.

Не менее половины источников должно быть включено в один из ведущих индексов цитирования: Российский индекс научного цитирования eLibrary, Web of Science, Scopus, Chemical Abstracts, MathSciNet, Springer и др. В случае присвоения публикациям цифрового идентификатора объекта (DOI) его необходимо указать, что позволит однозначно идентифицировать объект в базах данных.

Состав источников должен быть актуальным и содержать не менее половины современных (не старше 10 лет) статей из научных журналов или других публикаций.

В списке литературы должно быть не более 30 % источников, автором либо соавтором которых является автор статьи.

Следует обратить внимание на публикации диссертаций (особенно докторских), защищенных в последние годы по ближайшей научной специальности или группе специальностей. Для поиска рекомендуется использовать ресурс <http://www.dissercat.com>.

Не следует включать в список литературы ГОСТы; ссылки на них должны быть даны непосредственно по тексту статьи.

Убедитесь, что указанная в списке литературы информация (Ф.И.О. автора, название книги или журнала, год издания, том, номер и количество (интервал) страниц) верна.

Неопубликованные результаты, проекты документов, личные сообщения и т.п. не следует указывать в списке литературы, но они могут быть упомянуты в тексте.

**2.8. References** (пристайные списки литературы на английском языке). Представление в References только транслитерированного (без перевода) описания недопустимо. Обращаем Ваше внимание, что перевод названия статей следует давать так, как он проходил при их публикации, а перевод названий журналов должен быть официально принятым. Произвольное сокращение названий источников цитирования приведет к невозможности идентифицировать ссылку в электронных базах данных.

При составлении References необходимо следовать схеме:

- ИОФ авторов (транслитерация; для ее написания используйте сайт <http://fotosav.ru/services/transliteration.aspx>, обязательно включив в настройках справа сверху флажок «Американская (для визы США)»; если автор цитируемой статьи имеет свой вариант транслитерации своей фамилии, следует использовать этот вариант);
- заглавие на английском языке — для статьи, транслитерация и перевод названия — для книги;
- название источника (журнала, сборника статей, материалов конференции и т.п.) в транслитерации и на английском языке (курсивом, через косую черту);
- выходные данные;
- указание на язык изложения материала в скобках (например, (in Russian)).

*Например:* D.N. Sokolov, L.P. Vogman, V.A. Zuykov. Microbiological spontaneous ignition. *Pozharnaya bezopasnost / Fire Safety*, 2012, no. 1, pp. 35-48 (in Russian) (Другие примеры см. [www.fire-smi.ru](http://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!