

1-2025

**FIRE** SAFETY ПОЖАРОВЗРЫВО-

# БЕЗОПАСНОСТЬ



НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКИЙ ЖУРНАЛ

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

ИССЛЕДОВАНИЕ  
ОГНЕЗАЩИТНЫХ  
СОСТАВОВ  
ДЛЯ ДРЕВЕСИНЫ



КОМПЛЕКСНАЯ БЕЗОПАСНОСТЬ

пожарная • промышленная • производственная • экологическая



**УЧРЕДИТЕЛЬ и ИЗДАТЕЛЬ —**

ФГБОУ ВО «Национальный  
исследовательский  
Московский государственный  
строительный университет»

**Адрес:**

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

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

СМИ зарегистрировано Федеральной  
службой по надзору в сфере связи,  
информационных технологий и массовых  
коммуникаций — свидетельство  
ПИ № ФС 77-79402 от 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](mailto: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 27.02.2025.

Выход в свет 28.02.2025.

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](http://www.ro.wikipedia.org),  
[www.krd.energo-e.ru](http://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, Ньютаунбери, Велико-  
британия)

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

**РЕДАКЦИОННАЯ КОЛЛЕГИЯ:**

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

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

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

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

**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

М.В. ГРАВИТ, О.А. ЗЫБИНА,  
И.Л. КОТЛЯРСКАЯ, М.Б. ЯСКОЛКО  
Пожарно-технические характеристики рулонных  
базальтовых материалов, кашированных фольгой

5

M.V. GRAVIT, O.A. ZYBINA,  
I.L. KOTLYARSKAYA, M.B. YASKOLKO  
Fire-technical characteristics of rolled basalt materials  
laminated with foil

М.А. КРАСИЛЬНИКОВА, Н.М. БАРБИН  
Исследование огнезащитных составов  
для древесины

23

M.A. KRASILNIKOVA, N.M. BARBIN  
Fire-retardant compositions  
for wood

А.Г. СОКОЛОВА, К.Р. ГАБДУЛХАЕВ, Е.М. ГОТЛИБ  
Свойства и фазовый состав силикатных наполнителей,  
полученных на основе различных продуктов  
переработки рисовой шелухи

32

A.G. SOKOLOVA, K.R. GABDULKHAYEV, E.M. GOTLIB  
Properties and phase composition  
of silicate fillers obtained on the basis  
of different rice husk processing products

### МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ, ЧИСЛЕННЫЕ МЕТОДЫ И КОМПЛЕКСЫ ПРОГРАММ

### MATHEMATICAL MODELING, NUMERICAL METHODS AND PROGRAM COMPLEXES

Т.Ю. ЕРЕМИНА, Д.А. МИНАЙЛОВ  
Особенности применения метода конечных элементов  
при выполнении теплотехнических расчетов незащищенных  
стальных строительных конструкций в рамках разработки  
проектной документации по их огнезащите

40

T.Yu. EREMINA, D.A. MINAILOV  
Application of the finite element method for thermal  
calculations of unprotected steel building structures within  
the framework of development of design documentation  
for their fire protection

### БЕЗОПАСНОСТЬ ЗДАНИЙ, СООРУЖЕНИЙ, ОБЪЕКТОВ

### SAFETY OF BUILDINGS, STRUCTURES, OBJECTS

Е.В. ГВОЗДЕВ  
Методика оценки рисков в системе комплексной безопасности,  
предназначенной для предупреждения аварий и пожаров  
на взрывопожароопасных предприятиях

59

E.V. GVOZDEV  
Methodology of risk assessment in the system of integrated  
safety designed to prevent accidents and fires at explosion  
and fire hazardous enterprises

### АВТОМАТИЗИРОВАННЫЕ СИСТЕМЫ И СРЕДСТВА

### AUTOMATED SYSTEMS AND MEANS

М.И. ГЛОТОВ, С.С. КРОПОТОВА, П.А. СТРИЖАК  
Использование видеоаналитики  
для раннего обнаружения возгорания

70

M.I. GLOTOV, S.S. KROPOTOVA, P.A. STRIZHAK  
Using video analytics for early  
fire detection

### ВОПРОС – ОТВЕТ

### QUESTION – ANSWER

А.С. ХАРЛАМЕНКОВ  
Пожарная опасность накопления пыли  
в электроустановках. Часть 2

79

A.S. KHARLAMENKOV  
Fire hazard of dust accumulation  
in electrical installations. Part 2

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.





Пожарно-технические характеристики базальтовых материалов

Стр. 5



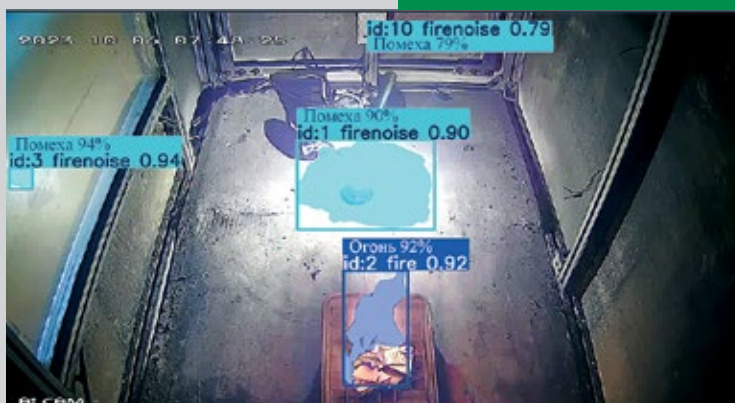
Стр. 23

Исследование огнезащитных составов для древесины



Свойства и фазовый состав силикатных наполнителей из рисовой шелухи

Стр. 32



Стр. 70

Использование видеоаналитики для раннего обнаружения возгорания

Стр. 79



Пожарная опасность накопления пыли в электроустановках



No. **1** 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 Yaroslavl'skoe 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 Yaroslavl'skoe shosse, Moscow,  
129337, Russia

**Corresponding to:** Yaroslavl'skoe 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 27.02.2025.

Date of publication 28.02.2025.

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 Yaroslavl'skoe 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)

ПОЖАРОВЗРЫВБЕЗОПАСНОСТЬ/FIRE AND EXPLOSION SAFETY. 2025. Т. 34. № 1. С. 5–22  
 POZHAROVZRYVOBEZOPASNOST/FIRE AND EXPLOSION SAFETY. 2025; 34(1):5-22

НАУЧНАЯ СТАТЬЯ/RESEARCH PAPER

УДК 699.812.2

<https://doi.org/10.22227/0869-7493.2025.34.01.5-22>

## Пожарно-технические характеристики рулонных базальтовых материалов, кашированных фольгой

Марина Викторовна Гравит<sup>1</sup>, Ольга Александровна Зыбина<sup>1</sup>,  
 Ирина Леонидовна Котлярская<sup>1</sup>✉, Михаил Борисович Ясколко<sup>2</sup>

<sup>1</sup> Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого, г. Санкт-Петербург, Россия

<sup>2</sup> ООО «Коллегия Независимых Экспертов», г. Краснодар, Россия

### АННОТАЦИЯ

**Введение.** Базальтовая теплоизоляция широко применяется в строительстве зданий и сооружений ввиду своего основного показателя — НГ (негорючий материал). Объектом исследования являются пятнадцать образцов базальтовой теплоизоляции, кашированных фольгой, которые активно используются на строительном рынке для теплоизоляции зданий, инженерных решений противопожарных барьеров и обеспечения огнестойкости конструкций, воздуховодов и кабельных проходов.

**Цель исследования.** Цель работы заключалась в определении материалов к категории «негорючего материала» среди представленных пятнадцати образцов.

**Метод исследования.** Контрольные испытания на негорючесть проходили в соответствии с требованиями ГОСТ 30244–94 «Материалы строительные. Методы испытаний на горючесть». Изучаемые материалы по структуре являются слоистыми, поэтому исследованию подлежали все слои по отдельности (базальтовое волокно и фольга с остатками клея).

**Результаты исследования.** В результате испытаний установлено, что тринадцать из исследуемых материалов не соответствуют требованиям негорючести и только два материала оказались негорючими, т.е. полностью соответствующими требованиям по пожарной безопасности и могут применяться без ограничений. Из образцов, которые показали неудовлетворительные результаты, три материала изготовлены из негорючих составляющих, но сочетание алюминиевой фольги и силикатного клея привело к возникновению алюминотермической реакции, при которой температура в камере достигала значений выше 1000 °С, ввиду выхода термопар из строя эксперимент прекращали. Исследования следует продолжать и на основе большой выборки статистических данных для различных материалов из комбинированных слоев, следует внести дополнение в нормативные документы по методу испытаний на горючесть, что при испытании многослойного материала необходимо испытывать не только каждый слой по отдельности, но также и весь материал полностью, так как комбинирование различных, пусть и негорючих компонентов может привести к аддитивным эффектам и в результате их можно отнести к группе горючих материалов.

**Ключевые слова:** огонь; пожарная безопасность; строительные материалы; негорючесть; горючесть; базальтовое волокно; фольга; многослойный материал; методы испытаний

**Благодарности.** Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда № 23–29-00618. URL: <https://rscf.ru/project/23-29-00618/> (дата обращения: 01.06.2024).

**Для цитирования:** Гравит М.В., Зыбина О.А., Котлярская И.Л., Ясколко М.Б. Пожарно-технические характеристики рулонных базальтовых материалов, кашированных фольгой // Пожаровзрывобезопасность/Fire and Explosion Safety. 2025. Т. 34. № 1. С. 5–22. DOI: 10.22227/0869-7493.2025.34.01.5-22

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

## Fire-technical characteristics of rolled basalt materials laminated with foil

Marina V. Gravit<sup>1</sup>, Olga A. Zyбина<sup>1</sup>, Irina L. Kotlyarskaya<sup>1</sup>✉, Mikhail B. Yaskolko<sup>2</sup>

<sup>1</sup> Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University, Saint Petersburg, Russian Federation

<sup>2</sup> LLC “Collegium of Independent Experts”, Krasnodar, Russian Federation

### ABSTRACT

**Introduction.** Basalt thermal insulation is widely used in the construction of buildings and structures due to its main indicator — non-flammable material. The object of the study are fifteen specimens of basalt thermal insu-

lation laminated with foil, which are actively used in the construction market for thermal insulation of buildings, engineering solutions for fire barriers and fire resistance of structures, air ducts and cable penetrations.

**Purpose of the study.** The purpose of the study was to identify materials in the category of “non-combustible material” among the fifteen specimens presented.

**Methods of the study.** Control tests for incombustibility were carried out in accordance with the requirements of GOST 30244–94 “Building materials. Methods of testing for combustibility”.

**Results of the study.** The studied materials are layered in structure; therefore, all layers were studied separately (basalt fibre and foil with glue residues). As a result of the tests, it was found that thirteen of the studied materials do not meet the requirements of incombustibility, and only two materials turned out to be incombustible, that is, they fully comply with fire safety requirements and can be used without restrictions. Of the specimens that showed unsatisfactory results, three materials were made of non-flammable components, but the combination of aluminum foil and silicate glue led to an aluminothermic reaction in which the temperature in the chamber reached values above 1,000 °C, due to the failure of the thermocouples, the experiment was stopped. Research should be continued on the basis of a large specimen of statistical data for various materials from combined layers, an addition should be made to the regulatory documents on the test method for flammability, that when testing a multilayer material, it is necessary to test not only each layer separately, but also the entire material completely, since the combination of various, albeit non-flammable components, it can lead to additive effects and, as a result, belongs to the group of combustible materials.

**Keywords:** fire; fire safety; building materials; incombustibility; combustibility; basalt fibre; foil; multilayer material; test methods

**Acknowledgments.** The research was funded by the Russian Science Foundation (RSF) under Grant No. 23-29-00618. URL: <https://rscf.ru/project/23-29-00618/> (date of application: 01.06.2024).

**For citation:** Gravit M.V., Zybina O.A., Kotlyarskaya I.L., Yaskolko M.B. Fire-technical characteristics of rolled basalt materials laminated with foil. *Pozharovzryvbezopasnost/Fire and Explosion Safety*. 2025; 34(1):5-22. DOI: 10.22227/0869-7493.2025.34.01.5-22 (rus).

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

## Введение

За последнее десятилетие разработано множество теплоизоляционных материалов для зданий и сооружений (фасадные конструкции, противопожарные барьеры) и средств огнезащиты строительных конструкций, воздуховодов, кабельных проходок [1, 2]. Самые распространенные из них: огнезащитные вспучивающиеся лакокрасочные покрытия, штукатурки и конструктивная защита — рулонные и плитные [3] (рис. 1). Первая группа материалов активно применяется для защиты стальных конструкций, так как при температурах 200–250 °C они образуют обугленный слой с низкой теплопроводностью [4]. Кроме того, данные материалы под воздействием повышенных температур могут выделять продукты, препятствующие горению (например, фосфорная кислота), а также в результате эндотермических реакций выделяют газы, охлаждающие поверхности, подверженные воздействию огня [5].

Рулонные конструктивные материалы изготавливаются из минерального сырья с последующей технологической обработкой. Плотность и жесткость покрытия обеспечивается с помощью армирования и применением различных типов покрывных материалов, выполненных из негорючих материалов [6]. Отмечается тенденция [7] к использованию натуральных, экологически чистых волокон базальта в рулонных покрытиях благодаря своим исключительным механическим и термическим свойствам, а также химической стабильности [8–10].

По сравнению с углеродными, стеклянными или другими минеральными волокнами, в целом воздействие на окружающую среду всего комплекса технических процессов, связанных с получением и использованием базальтовых волокон, значительно ниже [11].

В статье [12] исследуется огнезащитная эффективность базальтового рулонного материала при покрытии легких стальных тонкостенных конструкций (ЛСТК). В ходе экспериментальных и численных исследований было установлено, что огнестойкость ЛСТК повышается в 2–4 раза. В работах [13, 14] рассматривается инновационный материал аэрогель, который для удобного применения наносится на тканевую основу и эффективно используется как огнезащитный материал.

Среди рулонных материалов активно применяются теплоизоляционные покрытия, кашированные фольгой [15]. Согласно [16, 17], утеплители с фольгой обладают высокой отражательной способностью и сохраняют тепло гораздо эффективнее, чем материалы без защитного слоя. Фольга является паро- и влаго непроницаемым материалом, а также защищает изоляцию от вредных излучений извне. В качестве примера кашированного фольгой покрытия из базальта в статье [18] рассматривается материал, основу которого составляют супертонкие базальтовые волокна, скрепленные между собой естественным образом без добавления клея и прошитые вязально-прошивным методом. Материал обклеен слоем фольги. Материал показал термостойкие свойства и рекомендован авто-



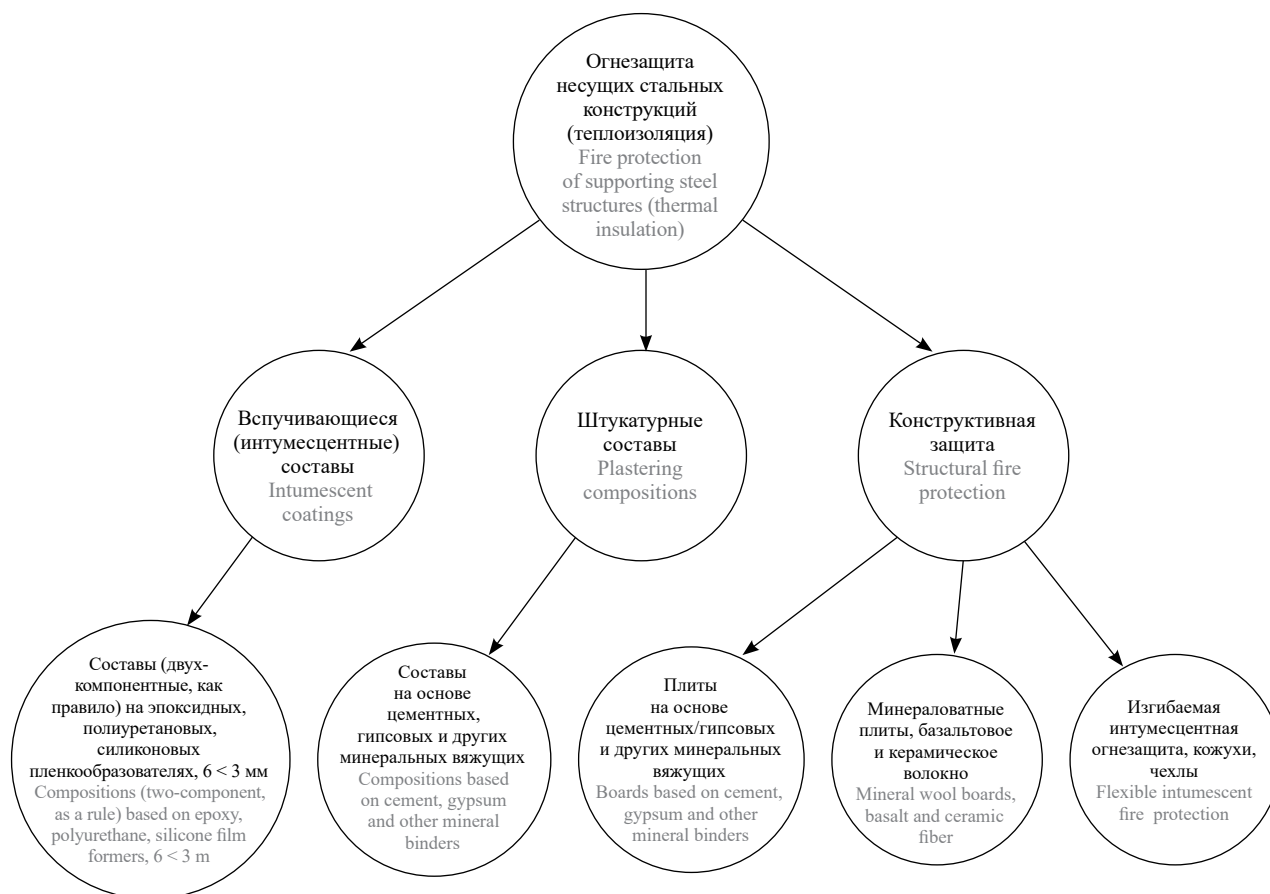


Рис. 1. Основные виды и типы огнезащитных материалов

Fig. 1. Main types and kinds of fire retardant materials

рами статьи [18] к применению в качестве материала для пассивной противопожарной защиты.

Согласно российскому стандарту ГОСТ 30244–94<sup>1</sup>, существует два метода определения негорючести. Испытания рекомендуется начинать по методу I, если массовая доля органических веществ в материале составляет не более 2 %. Строительные материалы в зависимости от значений параметров горючести, определяемых по методу I, подразделяют на негорючие (НГ) и горючие (Г). В европейских нормах<sup>2, 3</sup> учитывается, что неоднородный многослойный материал следует испытывать на горючесть и как единую систему, и как составную из разных компонентов [19]. Такой подход расширяет группу материалов, которые могут быть отнесены к горючим или негорючим.

В представленной статье рассмотрены 15 образцов базальтовой теплоизоляции кашированной фольгой, которые активно используются на строи-

тельном рынке для теплоизоляции и обеспечения огнестойкости конструкций.

Цель исследования: определение возможности классификации образцов базальтовой теплоизоляции с алюминиевой фольгой как негорючего материала согласно действующим нормативным документам.

## Материалы и методы

**Материалы.** Для исследования применены 15 образцов изделий базальтовых огнезащитных рулонных с фольгированным покрытием с одной стороны. Характеристики используемых материалов представлены в табл. 1.

**Методы.** Контрольные испытания на негорючесть проходили в соответствии с требованиями ГОСТ 30244–94<sup>1</sup>, согласно которому строительные материалы можно отнести к негорючим, если выполняются три критерия, представленные в табл. 2.


Метод испытания на горючесть для отнесения строительных материалов к негорючим или к горючим применяют для однородных строительных материалов (рис. 2), соответственно, если материал является слоистым, то исследованию подлежат все слои

<sup>1</sup> ГОСТ 30244–94. Материалы строительные. Методы испытаний на горючесть. URL: <https://docs.cntd.ru/document/9056051> (дата обращения: 13.04.2024).

<sup>2</sup> EN 13823. Single Burning Item (SBI).

<sup>3</sup> EN ISO 1182. Non-Combustibility Apparatus.

**Таблица 1.** Характеристики исследуемых образцов  
**Table 1.** Characteristics of the studied specimens

Номер образца Specimen number	Плотность, кг/м <sup>3</sup> Density, kg/m <sup>3</sup>	Толщина, мм Thickness, mm	Шаг прошивки, мм Stitching pitch, mm	Длина, мм Length, mm	Ширина, мм Width, mm	Вид Type
1	70	5	10	17 000	1200	
2	105	5	17	17 000	1200	
3	85	5	16	29 500	1200	
4	75	5	20	17 000	1200	
5	80	5	18,5	17 000	1200	

Продолжение табл. 1 / Continue of the Table 1

Номер образца Specimen number	Плотность, кг/м <sup>3</sup> Density, kg/m <sup>3</sup>	Толщина, мм Thickness, mm	Шаг прошивки, мм Stitching pitch, mm	Длина, мм Length, mm	Ширина, мм Width, mm	Вид Type
6	0,57	5	20	17 000	1500	
7	80	5	20	17 000	1000	
8	100	5	20	17 000	1200	
9	80–100	5	20	17 000	1200	
10	91	5	28	17 000	1000	



Номер образца Specimen number	Плотность, кг/м <sup>3</sup> Density, kg/m <sup>3</sup>	Толщина, мм Thickness, mm	Шаг прошивки, мм Stitching pitch, mm	Длина, мм Length, mm	Ширина, мм Width, mm	Вид Type
11	70–100	5	18	17 000	1200	
12	100	5	19	17 000	1200	
13	–	5	–	17 000	1200	
14	70–100	5	18	17 000	1200	
15	80	5	18	17 000	1200	

по отдельности. Неоднократные испытания, проведенные в различных испытательных центрах, однозначно позволяют утверждать, что по отдельности базальтовый холст [8, 20], алюминиевая фольга [21] и отвердевший силикатный клей [22] являются негорючими материалами. Однако сочетание двух негорючих веществ не всегда может признаваться негорючим.

В связи с невозможностью отделения клеевого слоя от поверхности готового изделия без повреждения испытания минераловатной ваты и алюминиевой фольги будут проходить по отдельности, каждый материал будет испытываться с остатками клеевого слоя. Из материалов были сформированы образцы диаметром 45 мм и высотой 50 мм из минераловатной ваты и алюминиевой фольги по отдельности по пять штук для каждого вида материала, т.е. всего испытуемых образцов было 150 ( $15 \times 2 \times 5 = 150$  штук). Толщина алюминиевой фольги с остатками клея составляет порядка 30 мкм, поэтому в соответствии с ГОСТ 30244–94<sup>1</sup> образцы изготавливались из соответствующего количества слоев, обеспечивающих необходимую толщину, примерно 1666 штук для одного образца. Слои материала с целью предотвращения образования между ними воздушных зазоров плотно соединены при помощи тонкой стальной проволоки диаметром 0,5 мм.

Образцы помещались в камеру возгорания, нагретую до температуры 750 °С. По показаниям трех термоэлектрических преобразователей, кото-

Таблица 2. Критерии отнесения строительных материалов к группе негорючих (НГ) согласно ГОСТ 30244–94<sup>1</sup>

Table 2. Criteria for classifying building materials as incombustible according to GOST 30244–94<sup>1</sup>

Показатель Indicator	Значение показателя, не более Indicator value, no more than
Приrost температуры в печи $\Delta T$ , °C Furnace temperature increase $\Delta T$ , °C	50
Потеря массы образца $\Delta m$ , % Specimen mass loss $\Delta m$ , %	50
Продолжительность устойчивого пламенного горения $t_b$ , с Duration of stable flame combustion $t_b$ , s	10

рые расположены у стены камеры, на поверхности и внутри образца, фиксировалась максимальная и конечная температуры, а также наличие пламенного возгорания. По окончании опыта регистрировалась потеря массы каждого образца и рассчитывалось ее изменение в процентах от первоначальной массы.

Дополнительное исследование горючести образцов алюминиевой фольги было проведено тем же методом в другой независимой лаборатории. Исследованию подлежали образцы, изготовленные из тех же самых материалов, но в количестве одного экземпляра для каждого вида материала.

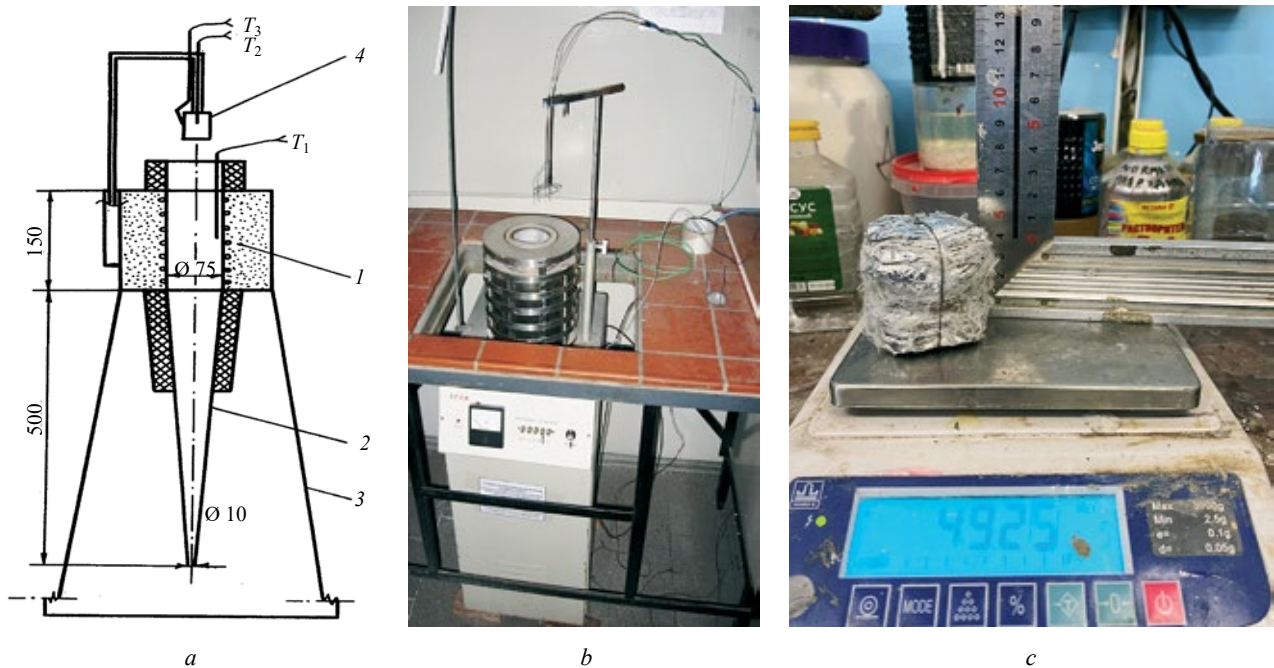


Рис. 2. а — общий вид установки, схема установки для определения группы горючести материалов: 1 — трубчатая электропечь; 2 — стабилизатор; 3 — подставка; 4 — держатель образца;  $T_1$ ,  $T_2$ ,  $T_3$  — термодпары; б — внешний вид испытательной установки; в — готовый образец для испытания

Fig. 2. а — general view of the setup, diagram of the setup for determining the flammability group of materials: 1 — tubular electric furnace; 2 — stabilizer; 3 — stand; 4 — specimen holder;  $T_1$ ,  $T_2$ ,  $T_3$  — thermocouples; б — external view of the test setup; в — the finished specimen for testing

**Таблица 3.** Условия проведения испытаний  
**Table 3.** Test conditions

Параметр Parameter	Значение Value
Температура окружающей среды, °C Ambient temperature, °C	21–24
Атмосферное давление, кПа Atmospheric pressure, kPa	99,7–103,3
Относительная влажность воздуха, % Relative humidity, %	49,6

Условия проведения испытания представлены в табл. 3.

Продолжительность испытания для каждого образца составляет 30 мин. Испытание может быть прекращено через 30 мин при условии достижения температурного баланса к этому времени (изменение показаний каждой из трех термопар не более чем на 2 °C за 10 мин). Если по истечении 30 мин температурный баланс не будет достигнут хотя бы для одной из трех термопар, испытание будет продол-

жено, проверка наличия температурного баланса будет проходить с интервалом 5 мин.

### Результаты и обсуждение

Исследование базальтового покрытия без фольги на негорючесть представлено в табл. 4. Исследованию подлежало 75 образцов (15 видов по 5 штук). В табл. 4 занесены среднеарифметические значения измеряемых параметров ( $m_n$ ;  $m_k$ ;  $\Delta m$ , %;  $T_{пм}$ ;  $T_{пк}$ ;  $\Delta T_{печь}$ ;  $T_{пом}$ ;  $T_{пок}$ ;  $\Delta T_{пов}$ ;  $T_{цм}$ ;  $T_{цк}$ ;  $\Delta T_{вн}$ ;  $t_f$ ) по видам материалов (Образец № 1–15).

Во время испытания наблюдалось: изменение цвета у образцов № 2, 3, 4, 5, 6, 7, 8, 13, 14; тление ниток у образцов № 5, 8, 9, 10, 14; вспышки у образцов № 11, 12; усадка у образца № 13. После проведения испытания наблюдалось: изменение цвета у образцов № 1, 9, 10, 11, 12, 15; усадка у образца № 7; деформация по высоте у образца № 1. Образец базальта № 1 является горючим материалом согласно ГОСТ 30244–94<sup>1</sup>.

Исследование оставшегося слоя от базальтового покрытия (фольга с остатками клея) для

**Таблица 4.** Сводная таблица контрольных испытаний образцов базальтового волокна, отделенного от алюминиевой фольги базальтового изделия с покрытием (среднеарифметические значения)  
**Table 4.** Summary table of control tests of specimens of basalt fibre separated from aluminum foil (arithmetic mean values)

Номер образца Specimen number	Масса образца, г Specimen weight, g			Показания термопар, °C Thermocouple readings, °C									Время горения $t_p$ , с Time $t_c$ , s
	$m_n$ $m_i$	$m_k$ $m_f$	$\Delta m$ , %*	В печи In the furnace			На поверхности On the surface			Внутри образца Inside the specimen			
				$T_{пм}$ $T_{fm}$	$T_{пк}$ $T_{ff}$	$\Delta T_{печь}^{**}$ $\Delta T_{fur}^{**}$	$T_{пом}$ $T_{ssm}$	$T_{пок}$ $T_{ssf}$	$\Delta T_{пов}$ $\Delta T_{sur}$	$T_{цм}$ $T_{cm}$	$T_{цк}$ $T_{cf}$	$\Delta T_{вн}$ $\Delta T_{in}$	
1(1.1–1.5)	5,62	4,92	12,00	977	805	172	941	773	168	799	762	37	40
2(2.1–2.5)	4,26	4,11	3,00	806	803	2	785	783	2	764	762	1	0
3(3.1–3.5)	7,87	7,78	1,14	811	810	1	781	777	4	771	770	1	0
4(4.1–4.5)	9,72	8,68	10,66	796	794	2	791	784	7	767	766	1	0
5(5.1–5.5)	8,75	8,55	2,30	824	823	1	800	798	1	735	734	1	0
6(6.1–6.5)	8,68	8,61	0,80	828	827	1	793	792	1	747	746	1	0
7(7.1–7.5)	7,39	7,21	2,00	826	824	2	788	787	1	759	757	2	0
8(8.1–8.5)	9,46	8,25	12,73	804	801	3	802	796	6	768	767	2	0
9(9.1–9.5)	3,89	3,77	3,00	794	792	2	788	786	2	771	769	2	0
10(10.1–10.5)	7,79	7,70	1,11	792	790	1	786	785	1	773	772	1	0
11(11.1–11.5)	8,60	8,54	0,70	809	808	1	803	801	1	747	742	5	2
12(12.1–12.5)	9,58	9,44	1,40	814	813	1	785	783	2	755	754	1	0
13(13.1–13.5)	7,11	7,03	1,13	824	823	1	791	789	2	763	762	1	0
14(14.1–14.5)	6,72	6,22	1,55	825	824	1	783	781	2	750	748	3	0
15(15.1–15.5)	3,82	3,76	1,53	817	816	2	781	779	2	763	761	2	0

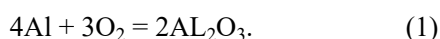
*Примечание:* \* — это среднее арифметическое изменений масс пяти образцов, изготовленных из одного из пятнадцати видов материалов; \*\* — это среднее арифметическое изменений температуры в печи при испытании пяти образцов, изготовленных из одного из пятнадцати видов материалов. Аналогично вычисляются значения в ячейках таблицы для изменения температуры на поверхности образца  $\Delta T_{пов}$  и внутри образца  $\Delta T_{вн}$ .

*Note:* \* is the arithmetic mean of the changes in masses of five specimens made from one of fifteen types of materials; \*\* is the arithmetic mean of the changes in oven temperature when testing five specimens made from one of fifteen types of materials. The values in the cells of the table for the temperature change on the surface of the specimen  $\Delta T_{sur}$  and inside the specimen  $\Delta T_{in}$  are calculated in the same way.



всех пятнадцати образцов представлено в табл. 5. Исследованию подлежало 75 образцов (15 видов по 5 штук). Аналогично табл. 4 в табл. 5 занесены среднеарифметические значения измеряемых параметров ( $m_n$ ;  $m_k$ ;  $\Delta m$ , %;  $T_{пм}$ ;  $T_{пк}$ ;  $\Delta T_{печь}$ ;  $T_{пом}$ ;  $T_{пок}$ ;  $\Delta T_{пов}$ ;  $T_{цм}$ ;  $T_{цк}$ ;  $\Delta T_{вн}$ ;  $t_r$ ) по видам материалов (образец № 1–15).

Исследование показало, что у образцов № 2, 13, 14 при горении увеличилась масса за счет образования оксида алюминия при взаимодействии с кислородом воздуха. Происходит химическая реакция, согласно которой из 4 моль алюминия образуется 2 моль алюминия оксида (1):



Многочисленные исследования методом термического анализа порошков алюминия и его соединений подтверждают данную реакцию [23–26]. На графике (рис. 3) кривая ТГ (термогравиметрическая кривая, красный цвет), характеризующая изменение массы образца в зависимости от тем-

пературы, демонстрирует прирост массы твердой составляющей алюминия при горении на 5,91 %.

Прирост массы образцов минеральной ваты также имеет место быть в некоторых случаях, связанных с окислением исходных продуктов в составе ваты, например окислением  $Fe^{2+}$  до  $Fe^{3+}$ , поскольку кислород входит в состав волокон в этом процессе, образуя металлические поверхностные оксиды [27]. На рис. 4 показаны графики прироста массы образца на 2,6 %. Таким образом, можно объяснить прирост массы (отрицательное значение в разнице массы до и после проведенных экспериментов) в табл. 4, 5, 6.

После проведения испытания на горючесть образцов наблюдалось изменение цвета у образцов № 2, 3, 4, 5, 6, 9, 10, 11, 12, 13, 14, 15; усадка по высоте у образцов № 1, 7, 8, 12, 13, 14, 15. Образцы фольги № 1, 2, 5, 9, 10, 11, 12, 13, 14, 15 являются горючими согласно ГОСТ 30244–94<sup>1</sup>. Таким образом, в ходе первого эксперимента определено, что образцы изделий «базальтовые огнезащитные рулонные с фольгированным покры-

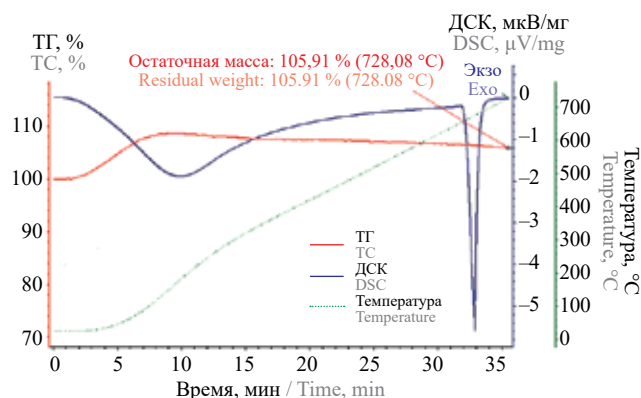
**Таблица 5.** Сводная таблица контрольных испытаний образцов фольги с остатками клея, отделенной от холста базальтовых супертонких волокон (среднеарифметические значения)

**Table 5.** Summary table of control tests of foil specimens with adhesive residues separated from the canvas of basalt superfine fibres (arithmetic mean values)

Номер образца Specimen number	Масса образца, г Specimen weight, g			Показания термопар, °C Thermocouple readings, °C									Время горения $t_b$ с Time $t_c$ , s
	$m_n$ $m_i$	$m_k$ $m_f$	$\Delta m$ , %*	В печи In the furnace			На поверхности On the surface			Внутри образца Inside the specimen			
				$T_{пм}$ $T_{fm}$	$T_{пк}$ $T_{ff}$	$\Delta T_{печь}^{**}$ $\Delta T_{fur}^{**}$	$T_{пом}$ $T_{ssm}$	$T_{пок}$ $T_{ssf}$	$\Delta T_{пов}$ $\Delta T_{sur}$	$T_{цм}$ $T_{cm}$	$T_{цк}$ $T_{cf}$	$\Delta T_{вн}$ $\Delta T_{in}$	
1(1.1–1.5)	5,62	4,92	12,00	977	805	172	941	773	168	799	762	37	40
2(2.1–2.5)	42,88	43,50	–2,00	922	866	56	842	786	56	837	807	30	55
3(3.1–3.5)	53,09	49,75	6,28	815	814	1	743	739	4	786	784	2	0
4(4.1–4.5)	50,86	49,59	2,49	840	838	2	780	778	2	806	803	3	0
5(5.1–5.5)	51,48	25,17	51,10	938	820	118	936	771	165	890	769	120	164
6(6.1–6.5)	45,79	40,86	10,80	801	799	2	789	787	1	771	769	2	0
7(7.1–7.5)	45,61	45,07	1,00	834	832	2	776	774	2	772	770	2	0
8(8.1–8.5)	43,66	43,58	0,12	804	800	4	830	825	5	794	793	1	0
9(9.1–9.5)	36,80	32,61	11,00	956	810	146	817	784	34	774	762	12	31
10(10.1–10.5)	37,78	32,52	13,90	823	820	3	792	790	2	819	797	22	81
11(11.1–11.5)	47,69	33,55	29,60	1036	800	236	919	751	168	876	791	85	207
12(12.1–12.5)	40,51	20,33	49,80	835	810	25	907	741	166	869	785	84	92
13(13.1–13.5)	46,34	62,14	–34,00	1201	840	361	1118	771	347	1204	771	433	0
14(14.1–14.5)	30,19	37,38	–23,86	1144	841	303	1209	827	382	1028	814	213	123
15(15.1–15.5)	33,54	14,23	56,98	1114	841	272	1210	827	384	1028	814	213	117

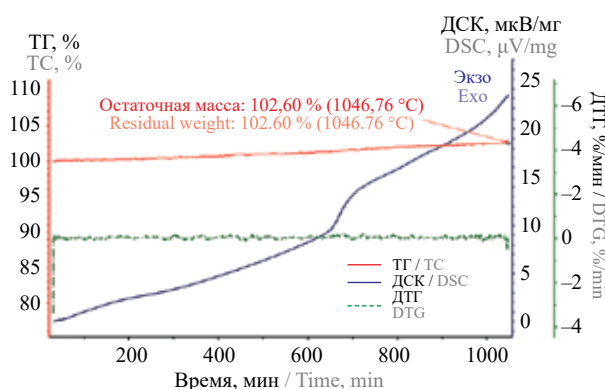
*Примечание:* \* — это среднее арифметическое изменений масс пяти образцов, изготовленных из одного из пятнадцати видов материалов; \*\* — это среднее арифметическое изменений температуры в печи при испытании пяти образцов, изготовленных из одного из пятнадцати видов материалов. Аналогично вычисляются значения в ячейках таблицы для изменения температуры на поверхности образца  $\Delta T_{пов}$  и внутри образца  $\Delta T_{вн}$ .

*Note:* \* is the arithmetic mean of the changes in masses of five specimens made from one of fifteen types of materials; \*\* is the arithmetic mean of the changes in oven temperature when testing five specimens made from one of fifteen types of materials. Similarly, the values in the cells of the table are calculated for the temperature change on the surface of the specimen  $\Delta T_{sur}$  and inside the specimen  $\Delta T_{in}$ .



**Рис. 3.** График термогравиметрического анализа алюминия в атмосфере воздуха при скорости горения 20 °С/мин, где красная кривая — термогравиметрическая кривая (ТГ), синяя — кривая дифференциальной сканирующей калориметрии (ДСК), штриховая линия — линия увеличения температуры

**Fig. 3.** Graph of thermogravimetric analysis of aluminium in air atmosphere at a combustion rate of 20 °C/min, where the red curve is the thermogravimetric curve (TC), the blue curve is the differential scanning calorimetry (DSC) curve, the dashed line is the line of temperature increase



**Рис. 4.** График термогравиметрического анализа минеральной ваты в атмосфере воздуха при скорости горения 20 °С/мин, где красная кривая — термогравиметрическая кривая (ТГ), синяя — кривая дифференциальной сканирующей калориметрии (ДСК), штриховая линия — линия увеличения температуры

**Fig. 4.** Graph of thermogravimetric analysis of mineral wool in air atmosphere at a combustion rate of 20 °C/min, where the red curve is the thermogravimetric curve (TC), the blue curve is the differential scanning calorimetry (DSC) curve, the dashed line is the line of temperature increase

**Таблица 6.** Сводная таблица контрольных испытаний образцов фольги с остатками клея, отделенной от холста базальтовых супертонких волокон (лаборатория № 2)





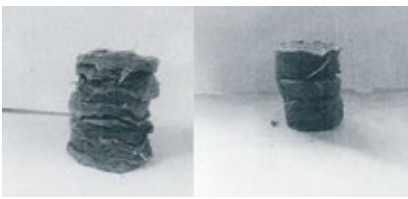



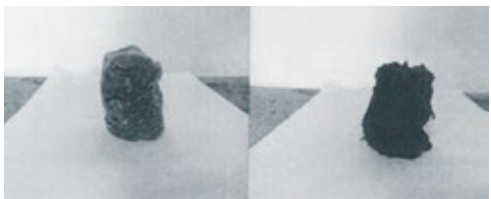

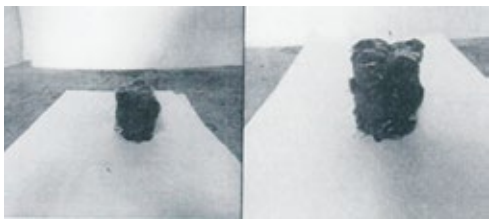

**Table 6.** Summary table of control tests of foil specimens with adhesive residues separated from the canvas of basalt superfine fibres (laboratory No. 2)

Номер образца Specimen number	Масса образца, г Specimen weight, g			Показания термопар, °C Thermocouple readings, °C									Время горения $t_p$ , с Time $t_c$ , s
	$m_n$ $m_i$	$m_k$ $m_f$	$\Delta m$ , %*	В печи In the furnace			На поверхности On the surface			Внутри образца Inside the specimen			
				$T_{nm}$ $T_{fm}$	$T_{nk}$ $T_{ff}$	$\Delta T_{печь}^{**}$ $\Delta T_{fur}^{**}$	$T_{nom}$ $T_{ssm}$	$T_{nok}$ $T_{ssf}$	$\Delta T_{пов}$ $\Delta T_{sur}$	$T_{nm}$ $T_{cm}$	$T_{nk}$ $T_{cf}$	$\Delta T_{вн}$ $\Delta T_{in}$	
1	49,25	47,00	4,56	742	742	0	30	330	300	30	402	372	> 25
2	64,50	59,15	8,29	750	750	0	30	352	322	30	352	322	> 20
3	82,70	85,25	−3,08	960	750	210	990	750	240	960	750	210	> 45
4	64,15	63,00	1,79	950	750	200	890	750	140	935	750	185	> 30
5	63,95	62,45	2,34	712	750	38	30	614	584	30	259	229	> 30
6	81,05	71,70	11,53	774	755	19	755	744	11	758	756	2	0
7	85,00	85,50	−0,58	762	753	9	750	738	12	756	748	8	0
8	82,95	88,25	−6,38	1016	750	266	1094	750	344	1004	750	254	> 100
9	39,60	21,60	45,45	945	757	188	826	737	89	782	737	45	> 50
10	60,65	56,25	7,25	750	845	95	30	816	786	30	277	247	> 40
11	49,95	45,05	9,80	750	754	4	30	373	343	30	196	166	> 30
12	48,40	47,65	1,54	735	750	15	30	249	219	30	369	339	> 30
13	82,30	83,50	−1,45	895	750	145	847	750	97	1092	750	342	> 100
14	74,45	74,00	0,60	963	750	213	883	750	133	1106	750	356	> 100
15	53,00	51,25	3,30	740	750	10	30	294	264	30	273	243	> 30



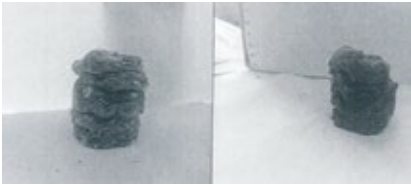





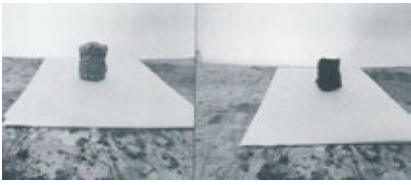
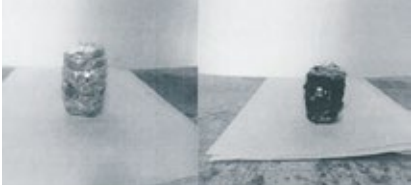




тием» с одной стороны под номерами № 3, 4, 6, 7 и 8 относятся к негорючим материалам. В табл. 7 представлены фотографии с образцами до и после испытания (один образец из пяти для каждого вида материала).

Образцы фольги с остатками клея, отделенные от холста базальтовых супертонких волокон, № 1–15 были дополнительно параллельно испытаны на аттестованном оборудовании в лаборатории № 2, результаты представлены в табл. 6. Исследования

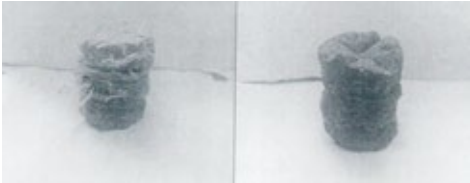
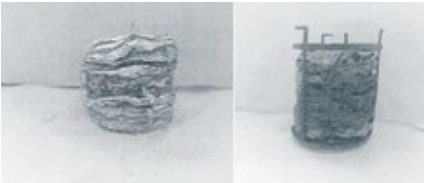
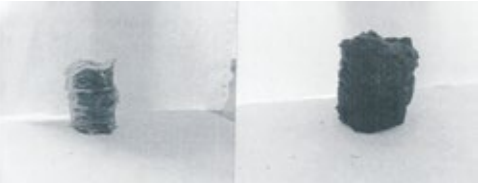

**Таблица 7.** Вид образцов до и после испытания  
**Table 7.** Type of specimens before and after the test

Номер образца Specimen number	Базальтовое волокно до и после испытаний Basalt fibre before and after testing	Алюминиевая фольга до и после испытаний Aluminum foil before and after testing
1 (1.1)		
2 (2.1)		
3 (3.1)		
4 (4.1)		
5 (5.1)		
6 (6.1)		



Номер образца Specimen number	Базальтовое волокно до и после испытаний Basalt fibre before and after testing	Алюминиевая фольга до и после испытаний Aluminum foil before and after testing
7 (7.1)		
8 (8.1)		
9 (9.1)		
10 (10.1)		
11 (11.1)		
12 (12.1)		
13 (13.1)		

Окончание табл. 7 / End of the Table 7

Номер образца Specimen number	Базальтовое волокно до и после испытаний Basalt fibre before and after testing	Алюминиевая фольга до и после испытаний Aluminum foil before and after testing
14 (14.1)		
15 (15.1)		

нию подлежали образцы, изготовленные из тех же самых материалов.







Во время испытания аналогичным образом, как и в первом исследовании (табл. 5), наблюдается прирост массы алюминия при горении. У образцов № 1, 2, 3, 4, 5, 8, 10, 11, 12, 13, 14, 15 наблюдалось изменение цвета; усадка по высоте произошла у образцов № 5, 9, 12, 15. При повторном испытании негорючими оказались только образцы № 6 и 7. Вид образцов после испытания представлен в табл. 8.

Проанализировав результаты двух испытаний по определению горючести образцов, можно заключить, что образцы № 6 и 7 являются негорючими, а образцы № 3, 4 и 8 требуют дополнительного изучения, так как они в разных экспериментах показали противоречивые результаты.

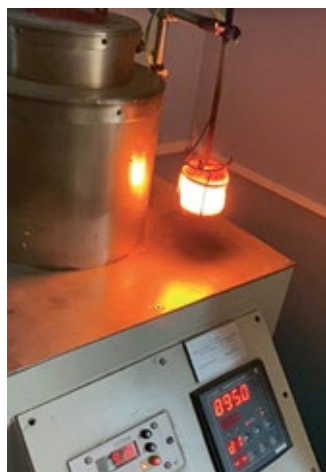
У всех образцов № 3, 4 и 8 при испытании возникала ранее не наблюдавшаяся у других образцов реакция — температура внутри образца линейно поднималась до значений, равных температуре плавления алюминия  $\approx 660^\circ\text{C}$ , далее наступала временная стабиль-

**Таблица 8.** Вид образцов (фольга с остатками клея) после испытания в лаборатории № 2

**Table 8.** Type of specimens (foil with adhesive residues) after testing in laboratory No. 2

Номер образца Specimen number	Вид Type	Номер образца Specimen number	Вид Type	Номер образца Specimen number	Вид Type
1		2		3	
4		5		6	

Номер образца Specimen number	Вид Type	Номер образца Specimen number	Вид Type	Номер образца Specimen number	Вид Type
7		8		9	
10		11		12	
13		14		15	



a



b

**Рис. 5.** Образец после извлечения из печи: *a* — наступила реакция; *b* — реакции не наблюдалось

**Fig. 5.** Specimen after extraction from the furnace: *a* — the reaction occurred; *b* — the reaction was not observed

лизация, после чего температура возрастала выше значения  $750^{\circ}\text{C}$ , поддерживаемого в канале печи испытательной установки, и через определенное время начинала резко расти. Образец начинал визуально светиться (рис. 5), наблюдалось дымовыделение, температура на поверхности и в канале печи вслед за температурой внутри образца превышала  $900^{\circ}\text{C}$ .

При испытании на негорючесть алюминиевой фольги с остатками силикатного клея (образец № 3, 4, 8) происходит взаимодействие расплавленного алюминия с натрием или калием, окислы которых находятся в составе силикатных клеев. Данное взаимодействие приводит к алюминотермической реакции, протекающей с выделением большого количества тепла. Температура алюминотермической реакции может достигать  $3000^{\circ}\text{C}$  [24, 28], причем восстановленный расплавленный металл нагревается до белого каления, что и наблюдается на рис. 4.



## Выводы

Исследование пятнадцати образцов рулонов утеплителя из базальтового супертонкого волокна, кашированного алюминиевой фольгой, согласно методу, определяемому как «негорючесть» для строительных и теплоизоляционных материалов, позволяет сделать следующие выводы:

1. Десять образцов из исследуемых материалов не соответствуют требованиям негорючести согласно стандарту; три образца материала изготовлены из негорючих составляющих, но при этом сочетание алюминиевой фольги и силикатного клея приводит к возможности возникновения алюмини-термической реакции, при которой температура может достигать 3000 °С.

2. Только два образца материала из пятнадцати оказались негорючими, они полностью соответствуют актуальным требованиям по пожарной безопасности и могут применяться без ограничений.

3. Исследования показали, что испытать каждый слой образцов недостаточно: необходимо исследовать на показатель негорючести и весь материал

в целом. По отдельности базальтовый холст, алюминиевая фольга и отвердевший силикатный клей являются негорючими материалами, а комбинация фольги и клея привела к реакции, при которой температура достигала выше 1000 °С и термопары приходили в неисправное состояние.

4. На основе статистических данных для различных материалов из комбинированных слоев в нормативные документы в перспективе следует ввести положение, что при испытании многослойного материала на негорючесть необходимо испытывать не только каждый слой по отдельности, но также и весь материал полностью, так как комбинирование различных, пусть и негорючих компонентов может привести к аддитивным эффектам и далее определяться уже как горючий материал.

5. После проведения соответствующих научно-исследовательских работ рекомендуется рассмотреть возможность изменений в ГОСТ 30244–94<sup>1</sup> в части метода I — корректировку значений параметров горючести для классификации строительных материалов по классам «горючие» и «негорючие».

## СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Портнов Ф.А., Еремина Т.Ю., Корольченко Д.А. Обеспечение огнестойкости воздуховодов систем дымоудаления с огнезащитными покрытиями // Промышленное и гражданское строительство. 2021. № 9. С. 24–30. DOI: 10.33622/0869-7019.2021.09.24-30. EDN ZQTEPX.
2. Королева Т.И., Каледа И.А., Ивачев М.А. Противодымная защита жилых зданий повышенной этажности // Образование и наука в современном мире. Инновации. 2020. № 27 (2). С. 166–175. EDN YZWDNH.
3. Zybina O., Gravit M. Intumescent coatings for fire protection of building structures and materials // Springer Series on Polymer and Composite Materials. 2020. DOI: 10.1007/978-3-030-59422-0
4. Zhang C. Thermal properties of intumescent coatings in fire // Reliability of Steel Columns Protected by Intumescent Coatings Subjected to Natural Fires. 2015. Pp. 37–50. DOI: 10.1007/978-3-662-46379-6\_4
5. Кропачев Р.В., Новокионов В.В., Вольфсон С.И., Михайлова С.Н. Терморасширяющиеся полимерные композиционные материалы // Вестник Казанского технологического университета. 2015. № 5 (18). С. 60–63. EDN TOUASX.
6. Колчев Б.Б., Вислогузов П.А., Беляев Д.В. Огнестойкие воздуховоды систем вентиляции и кондиционирования // Охрана труда и техника безопасности на промышленных предприятиях. 2017. № 3. С. 24–27.
7. Jagadeesh P., Rangappa S.M., Siengchin S. Basalt fibers: An environmentally acceptable and sustainable green material for polymer composites // Construction and Building Materials. 2024. No. 436. P. 136834. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2024.136834
8. Pang Y., Zhong Z., Liu H., Rao L. Research on Fire-Resistant Fabric Properties of Basalt Fiber // Applied Mechanics and Materials. 2012. Pp. 1151–1154. DOI: 10.4028/www.scientific.net/AMM.217-219.1151
9. Gravit M., Prusakov V., Shcheglov N., Kotlyarskaya I. Fire Protection of Steel Structures of Oil and Gas Facilities: Multilayer, Removable, Non-Combustible Covers // Fire. 2024. Vol. 7. P. 86. DOI: 10.3390/fire7030086.
10. Prusakov V.A., Gravit M.V., Simonenko Y.B. Superthin Basalt Fiber as the Base of a Matrix of the Fire-Resistant Filling of Deformation Joints in Building Structures // Glass Physics and Chemistry. 2023. No. 1 (49). Pp. 75–80. DOI: 10.1134/S1087659622600879
11. Рубинов И. Выбрать оптимальное решение для защиты от огня строительных конструкций // ТехНадзор. 2013. № 79 (6). С. 94–95. EDN WITVAT.
12. Gravit M., Dmitriev I. Numerical modeling of basalt roll fire-protection for light steel thin-walled structures // Magazine of Civil Engineering. 2022. No. 4 (112). Pp. 11215–11215. DOI: 10.34910/MCE.112.15



13. Kotlyarskaya I.L., Vatin N.I., Gravit M.V., Abdikarimov R.A., Shinkareva M.K. Fire resistance of enclosing structures in modular construction : a review // AlfaBuild. 2023. No. 4 (29). Pp. 2906–2906. DOI: 10.57728/ALF.29.6
14. Vasileva I.L., Nemova D.V. Prospects of using aerogels in construction // AlfaBuild. 2018. No. 4 (6). Pp. 135–145. DOI: 10.34910/ALF.6.12
15. Ruffen C., Mahltig B. Basalt fibers as functional additives in coating of textiles // Journal of Coatings Technology and Research. 2021. No. 1 (18). Pp. 271–281. DOI: 10.1007/S11998-020-00383-8/TABLES/1
16. Гапоненко С.О., Фазлиев Р.А., Калинина М.В. Метод повышения эффективности тепловой изоляции трубопроводов систем теплоснабжения путем применения отражающего элемента // Вестник Казанского государственного энергетического университета. 2021. № 49 (1). С. 204–216. EDN XFDYEV.
17. Tenpierik M.J., Hasselaar E. Reflective multi-foil insulations for buildings : a review // Energy and Buildings. 2013. No. 56. Pp. 233–243. DOI: 10.1016/J.ENBUILD.2012.10.003
18. Budykina T., Anosova Y. Thermal resistance of fire retardant materials // Magazine of Civil Engineering. 2022. No. 4 (112). Pp. 11213–11213. DOI: 10.34910/MCE.112.13. EDN TNAYQX.
19. Гравит М.В., Недрышкин О.В., Вайтицкий А.А., Шнакова А.М., Нигматулина 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
20. Kim J., Song H., Shin H. Flame resistance performance of architectural membranes using basalt woven fabric // Fire Science and Engineering. 2016. No. 2 (30). Pp. 35–42. DOI: 10.7731/KIFSE.2016.30.2.035
21. Sánchez M.A., Sutton W.H., Sánchez C.A. Simulations of thermal performance for one- and two-dimensional insulation and aluminum foil fire barriers // Proceedings of the International Conference on Nuclear Engineering (ICONE12). 2008. No. 3. Pp. 89–95. DOI: 10.1115/ICONE12-49265
22. Skorodumova O., Tarakhno O., Babayev A., Chernukha A., Shvydka S. Study of phosphorus-containing silica coatings based on liquid glass for fire protection of textile materials // Key Engineering Materials. 2023. No. 954. Pp. 167–175. DOI: 10.4028/P-HGYQ9V
23. Коротких А.Г., Слюсарский К.В., Сорокин И.В. Кинетика термического окисления порошков AL, B, ALB<sub>2</sub> и ALB<sub>12</sub> // Химическая физика и мезоскопия. 2020. № 2 (22). С. 164–174. DOI: 10.15350/17270529.2020.2.16. EDN PGIDIA.
24. Макаров Г.С. О горении алюминия // Технология легких сплавов. 2021. № 1. С. 81–91. DOI: 10.24412/0321-4664-2021-1-81-91
25. Макаров Г.С. Эволюция плавки алюминиевых сплавов // Технология легких сплавов. 2018. № 3. С. 28–53. EDN YLFMIP.
26. Попенко Е.М., Ильин А.П., Громов А.М. Горение в воздухе промышленных порошков алюминия // Физика горения и взрыва. 2002. № 2 (38). С. 36–41.
27. Smedskjaer M.M., Solvang M., Yue Y. Crystallisation behaviour and high-temperature stability of stone wool fibres // Journal of the European Ceramic Society. 2010. No. 6 (30). Pp. 1287–1295. DOI: 10.1016/j.jeurceramsoc.2009.12.009
28. Богословский С.Ю., Кузнецов Н.Н., Атангулова А.Д. Модифицированный эксперимент по алюминотермии в студенческом практикуме по химии // Международный журнал экспериментального образования. 2023. № 2. С. 17–21. DOI: 10.17513/mjeo.12122

## REFERENCES

1. Portnov F.A., Eremina T.Yu., Korolchenko D.A. Ensuring fire resistance of air ducts of smoke extraction systems with fire-resistant coatings. *Industrial and civil construction*. 2021; 9:24-30. DOI: 10.33622/0869-7019.2021.09.24-30. EDN ZQTEPX. (rus).
2. Koroleva T.I., Kolyada I.A., Ivachev M.A. Smoke protection of high-rise residential buildings. *Education and science in the modern world. Innovation*. 2020; 27(2):166-175. EDN YZWDNH. (rus).
3. Zybina O., Gravit M. Intumescent coatings for fire protection of building structures and materials. *Springer Series on Polymer and Composite Materials*. 2020. DOI: 10.1007/978-3-030-59422-0
4. Zhang C. Thermal Properties of Intumescent Coatings in Fire. *Reliability of Steel Columns Protected by Intumescent Coatings Subjected to Natural Fires*. 2015; 37-50. DOI: 10.1007/978-3-662-46379-6\_4
5. Kropachev R.V., Novokshonov V.V., Wolfson S.I., Mikhailova S.N. Thermally expanding polymer composite materials. *Bulletin of the Kazan Technological University*. 2015; 5(18):60-63. EDN TOUASX. (rus).
6. Kolchev B.B., Visloguzov P.A., Belyaev D.V. Fire-resistant air ducts of ventilation and air conditioning systems. *Occupational health and safety at industrial enterprises*. 2017; 3:24-27. (rus).

7. Jagadeesh P., Rangappa S.M., Siengchin S. Basalt fibers: An environmentally acceptable and sustainable green material for polymer composites. *Construction and Building Materials*. 2024; 436:136834. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2024.136834
8. Pang Y., Zhong Z., Liu H., Rao L. Research on fire-resistant fabric properties of basalt fiber. *Applied Mechanics and Materials*. 2012; 1151-1154. DOI: 10.4028/www.scientific.net/AMM.217-219.1151
9. Gravit M., Prusakov V., Shcheglov N., Kotlyarskaya I. Fire protection of steel structures of oil and gas facilities: multilayer, removable, non-combustible covers. *Fire*. 2024; 7:86. DOI: 10.3390/fire7030086
10. Prusakov V.A., Gravit M.V., Simonenko Y.B. Superthin basalt fiber as the base of a matrix of the fire-resistant filling of deformation joints in building structures. *Glass Physics and Chemistry*. 2023; 1(49):75-80. DOI: 10.1134/S1087659622600879
11. Rubinov I. To choose the optimal solution for fire protection of building structures. *Technical Supervision*. 2013; 79(6):94-95. EDN WITVAT. (rus).
12. Gravit M., Dmitriev I. Numerical modeling of basalt roll fire-protection for light steel thin-walled structures. *Magazine of Civil Engineering*. 2022; 4(112):11215-11215. DOI: 10.34910/MCE.112.15
13. Kotlyarskaya I.L., Vatin N.I., Gravit M.V., Abdikarimov R.A., Shinkareva M.K. Fire resistance of enclosing structures in modular construction : a review. *AlfaBuild*. 2023; 4(29):2906-2906. DOI: 10.57728/ALF.29.6
14. Vasileva I.L., Nemova D.V. Prospects of using aerogels in construction. *AlfaBuild*. 2018; 4(6):135-145. DOI: 10.34910/ALF.6.12
15. Ruffen C., Mahltig B. Basalt fibers as functional additives in coating of textiles. *Journal of Coatings Technology and Research*. 2021; 1(18):271-281. DOI: 10.1007/S11998-020-00383-8/TABLES/1
16. Gaponenko S.O., Fazliev R.A., Kalinina M.V. Method of increasing the efficiency of thermal insulation of pipelines of heat supply systems by using a reflective element. *Bulletin of the Kazan State Energy University*. 2021; 49(1):204-216. EDN XFDYEV. (rus).
17. Tenpierik M.J., Hasselaar E. Reflective multi-foil insulations for buildings : a review. *Energy and Buildings*. 2013; 56:233-243. DOI: 10.1016/J.ENBUILD.2012.10.003
18. Budykina T., Anosova Y. Thermal resistance of fire retardant materials. *Magazine of Civil Engineering*. 2022; 4(112):11213-11213. DOI: 10.34910/MCE.112.13. EDN TNAYQX.
19. Gravit M.V., Nedryshkin O.V., Vaititsky A.A., Shpakova A.M., Nigmatulina D.G. Fire-technical characteristics of building materials in 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 (rus).
20. Kim J., Song H., Shin H. Flame Resistance Performance of Architectural Membranes Using Basalt Woven Fabric. *Fire Science and Engineering*. 2016; 2(30):35-42. DOI: 10.7731/KIFSE.2016.30.2.035
21. Sánchez M.A., Sutton W.H., Sánchez C.A. Simulations of thermal performance for one- and two-dimensional insulation and aluminum foil fire barriers. *Proceedings of the International Conference on Nuclear Engineering (ICONE12)*. 2008; 3:89-95. DOI: 10.1115/ICONE12-49265
22. Skorodumova O., Tarakhno O., Babayev A., Chernukha A., Shvydka S. Study of phosphorus-containing silica coatings based on liquid glass for fire protection of textile materials. *Key Engineering Materials*. 2023; 954:167-175. DOI: 10.4028/P-HGYQ9V
23. Korotkikh A.G., Slyusarskiy K.V., Sorokin I.V. Kinetics of thermal oxidation of AL, B, ALB<sub>2</sub> and ALB<sub>12</sub> powders. *Chemical Physics and Mesoscopy*. 2020; 2(22):164-174. DOI: 10.15350/17270529.2020.2.16. EDN PGIDIA. (rus).
24. Makarov G.S. On the gorenje of aluminum. *Technology of light alloys*. 2021; 1:81-91. DOI: 10.24412/0321-4664-2021-1-81-91 (rus).
25. Makarov G.S. Evolution of melting of aluminium alloys. *Technology of light alloys*. 2018; 3:28-53. EDN YLFMIP. (rus).
26. Popenko E.M., Ilyin A.P., Gromov A.M. Combustion in air of industrial aluminium powders. *Physics of combustion and explosion*. 2002; 2(38):36-41. (rus).
27. Smedskjaer M.M., Solvang M., Yue Y. Crystallisation behaviour and high-temperature stability of stone wool fibres. *Journal of the European Ceramic Society*. 2010; 6(30):1287-1295. DOI: 10.1016/j.jeurceramsoc.2009.12.009
28. Bogoslovsky S.Yu., Kuznetsov N.N., Atangulova A.D. Modified experiment on aluminothermy in a student's chemistry workshop. *International Journal of Experimental Education*. 2023; 2:17-21. DOI: 10.17513/mjeo.12122 (rus).

Поступила 18.09.2024, после доработки 26.01.2025;

принята к публикации 04.02.2025

Received September 18, 2024; Received in revised form January 26, 2025;

Accepted February 4, 2025

**Информация об авторах**

**ГРАВИТ Марина Викторовна**, к.т.н., доцент, ведущий научный сотрудник лаборатории механики многокомпонентных и многофазных сред, Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого, Россия, 195251, г. Санкт-Петербург, ул. Политехническая, 29, литера Б; ORCID: 0000-0003-1071-427X; ResearcherID: B-4397-2014; Scopus AuthorID: 56826013600; e-mail: marina.gravit@mail.ru

**ЗЫБИНА Ольга Александровна**, д.т.н., доцент, заведующая кафедрой пожарной безопасности, Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого, Россия, 195251, г. Санкт-Петербург, ул. Политехническая, 29, литера Б; ORCID: 0000-0001-9401-7206; ResearcherID: Q-4451-2017; Scopus AuthorID: 6504571187; e-mail: zybina\_oa@spbstu.ru

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

**ЯСКОЛКО Михаил Борисович**, президент, ООО «Коллегия Независимых Экспертов», Россия, 350007, г. Краснодар, ул. Заводская, 18, кв. 3; e-mail: mb0346@mail.ru

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

*Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.*

**Information about the authors**

**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, litera B, 29 Politekhnikeskaya st., Saint Petersburg, 195251, Russian Federation; ORCID: 0000-0003-1071-427X; ResearcherID: B-4397-2014; Scopus AuthorID: 56826013600; e-mail: marina.gravit@mail.ru

**Olga A. ZYBINA**, Dr. Sci. (Eng.), Associate Professor, Head of the Department of Fire Safety, Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University, litera B, 29 Politekhnikeskaya st., Saint Petersburg, 195251, Russian Federation; ORCID: 0000-0001-9401-7206; ResearcherID: Q-4451-2017; Scopus AuthorID: 6504571187; e-mail: zybina\_oa@spbstu.ru

**Irina L. KOTLYARSKAYA**, Jr. scientific co-workers Laboratory of Secure and Modular Structures, Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University, litera B, 29 Politekhnikeskaya st., Saint Petersburg, 195251, Russian Federation; ORCID: 0000-0002-8396-4870; ResearcherID: ABE-1858-2021; Scopus AuthorID: 57208300172; e-mail: iravassilek@mail.ru

**Mikhail B. YASKOLKO**, President, LLC “Collegium of Independent Experts”, sq. 3, 18 Zavodskaya st., Krasnodar, 350007, Russian Federation; e-mail: mb0346@mail.ru

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

*The authors declare no conflict of interest.*

ПОЖАРОВЗРЫВБЕЗОПАСНОСТЬ/FIRE AND EXPLOSION SAFETY. 2025. Т. 34. № 1. С. 23–31  
 POZHAROVZRYVOBEZOPASNOST/FIRE AND EXPLOSION SAFETY. 2025; 34(1):23-31

НАУЧНАЯ СТАТЬЯ/RESEARCH PAPER

УДК 004.93'12

<https://doi.org/10.22227/0869-7493.2025.34.01.23-31>

## Исследование огнезащитных составов для древесины

Маргарита Александровна Красильникова ✉, Николай Михайлович Барбин

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

### АННОТАЦИЯ

**Введение.** В последние годы популярность древесины и композитов на ее основе в качестве строительных материалов постоянно растет благодаря их доступности и простоте дальнейшей обработки. По данным Росстата, в 2020 г. были достигнуты рекордные показатели по строительству домов из древесины, составившие 9,35 млн м<sup>2</sup>. При этом древесина обладает высокой воспламеняемостью, что серьезно ограничивает ее применение в строительстве и других областях. В связи с этим исследования по ее огнезащите актуальны.

**Цель и задачи.** Исследовать огнезащитную эффективность вновь разработанных азотфосфорсодержащих огнезащитных составов (ОЗС) для древесины, полученных путем химической деструкции отходов полиэтилентерефталата (ПЭТФ) с алифатическими аминами и без них.

Для достижения поставленной цели были определены следующие задачи:

1. Получить огнезащитные составы для древесины на основе азотсодержащих продуктов деструкции полиэтилентерефталата ди- и полиаминами и без присутствия ПЭТФ.
2. Изучить огнезащитную эффективность вновь полученных огнезащитных составов для древесины.
3. Сравнить огнезащитную эффективность огнезащитных составов, полученных с применением полиэтилентерефталата и без него.

**Материалы и методы.** Объектами исследования были огнезащитные составы для древесины на основе продуктов аминолитизации полиэтилентерефталата алифатическими аминами. Метод заключался в определении потери массы образца древесины и времени самостоятельного горения при его испытании в установке «Керамическая труба».

**Выводы.** Разработанные огнезащитные составы для древесины на основе продуктов химической деструкции отходов полиэтилентерефталата обладают высокой огнезащитной эффективностью. В качестве ОЗС для древесины наиболее целесообразно использовать композицию на основе ПЭТФ – ПЭПА. Установлено, что разработанный состав относится к первой группе огнезащитной эффективности.

**Ключевые слова:** огнезащитная эффективность; полиэтилентерефталат; химическая деструкция, алифатические амины

**Для цитирования:** Красильникова М.А., Барбин Н.М. Исследование огнезащитных составов для древесины // Пожаровзрывобезопасность/Fire and Explosion Safety. 2025. Т. 34. № 1. С. 23–31. DOI: 10.22227/0869-7493.2025.34.01.23-31

✉ Красильникова Маргарита Александровна, e-mail: krasilnikova79@mail.ru

## Fire-retardant compositions for wood

Margarita A. Krasilnikova ✉, Nikolay M. Barbin

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

### ABSTRACT

**Introduction.** In recent years, the popularity of wood and composites based on it as building materials has been steadily increasing due to their availability and ease of further processing. According to Rosstat data, in 2020, record figures for the construction of houses from wood were reached, amounting to 9.35 million m<sup>2</sup>. However, wood is highly flammable, which severely limits its use in construction and other applications. Therefore, research on its fire protection is relevant.

**Aims and objectives.** To investigate the fire-retardant efficiency of the developed nitrogen-phosphorus-containing fire-retardant compositions (FRC) for wood obtained by chemical degradation of polyethylene terephthalate (PET) waste with and without aliphatic amines.

In order to achieve the objective, the following tasks were defined:

1. To obtain fire-retardant compositions for wood based on nitrogen-containing degradation products of polyethylene terephthalate with di- and polyamines and without the presence of PET.



2. To study the fire-retardant efficiency of the newly obtained fire-retardant compositions for wood.
3. To compare the fire-retardant effectiveness of fire-retardant compositions obtained with and without the use of polyethylene terephthalate.

**Methods.** The objects of the study were fire-retardant compositions for wood based on aminolysis products of polyethylene terephthalate by aliphatic amines. The method consisted in determining the mass loss of a wood specimen and the time of independent combustion when it was tested in the "Ceramic Tube" unit.

**Result and Discussion.** As a result of the conducted research, it was revealed that the obtained fire-retardant compositions based on the products of chemical destruction of polyethylene terephthalate at the consumption of more than 160 g/m<sup>2</sup> belong to the first group of fire protection efficiency.

**Conclusions.** The developed fire-retardant compositions for wood on the basis of products of chemical destruction of polyethylene terephthalate waste have high fire-retardant efficiency. It is most expedient to use the composition based on PET – PEPA as FR for wood. It is established that the developed composition belongs to the first group of fire protection efficiency.

**Keywords:** fire protection efficiency; polyethylene terephthalate; chemical destruction

**For citation:** Krasilnikova M.A., Barbin N.M. Fire-retardant compositions for wood. *Pozharovzryvobezopasnost'/Fire and Explosion Safety*. 2025; 34(1):23-31. DOI: 10.22227/0869-7493.2025.34.01.23-31 (rus).

✉ Margarita Aleksandrovna Krasilnikova, e-mail: krasilnikova79@mail.ru

## Введение

«Древесина — уникальный природный композиционный материал, занимающий по своему применению лидирующие позиции в различных отраслях промышленности. По своим физико-механическим свойствам, соотношению показателя прочности к массе древесина может уступать только синтетическим полимерным материалам. На сегодняшний день объемы промышленного потребления древесины постоянно увеличиваются, так как древесина относится к категории доступных, возобновляемых видов природного сырья и имеет сравнительно низкую себестоимость добычи и переработки. Значительно снижает срок службы деревянных конструкций высокая пожарная опасность древесины. В настоящее время тенденции развития сферы деревянного домостроения формируют необходимость поиска путей повышения их качества, обеспечения пожаробезопасности строительных конструкций. Одним из центральных вопросов при использовании деревянных конструкций в строительстве является обеспечение требуемых показателей по пожарной опасности и огнестойкости» [1, 2]. Антипирены препятствуют воспламенению, замедляют горение горючих материалов и снижают интенсивность обугливания древесины, что повышает пределы огнестойкости деревянных конструкций [3, 4]. Огнезащитные составы могут действовать физическими, химическими или комбинированными способами. Принцип процесса замедления заключается в блокировании доступа кислорода путем физического подавления пламени или инициирования химической реакции, которая останавливает горение [5, 6].

«Огнезащитные составы, наносимые на древесину под воздействием температуры, превращающиеся в слой пены толщиной 1 см, который выполняет роль теплоизоляции. В результате этого

возгорание дерева замедляется, и образование дыма значительно снижается» [7, 8].

Коллектив авторов из Китая разработал новый эффективный антипирен, состоящий из трис (2-гидроксиэтил) изоцианурат трифосфата аммония, который был получен без растворителей для повышения огнестойкости плит из древесины тополя. У древесных плит, обработанных 20%-ным раствором антипирена, предельный кислородный индекс достиг 65,1 % [9].

Авторы [10] разработали антипирен на основе фосфор-азотного металлокомплекса, содержащего соль магния, для пропитки древесины, существенно снижающий потери массы древесины при огневых испытаниях. Установлено, что нанесение огнезащитного препарата в количестве 300 г/м<sup>2</sup> позволяет получать материалы с огнезащитной эффективностью, соответствующей I группе эффективности.

Рассмотрено влияние коксообразующих антипиренов на прогрев и интенсивность обугливания древесины в условиях пожара. Показано, что применение средств огнезащиты может существенно влиять на показатель скорости обугливания деревянных



**Рис. 1.** Установка для определения эффективности огнезащитных составов «Керамическая труба»

**Fig. 1.** Installation for determining the effectiveness of fire-retardant compositions "Ceramic pipe"

конструкций. Показана необходимость продолжения изучения влияния различных огнезащитных систем на прогрев и скорость обугливания деревянных конструкций [11]. В статье [12] приводится оценка возможности создания огнезащитных покрытий методом мягкой поверхностной модификации древесины на основе фосфорорганических соединений [13] и нанодисперсного кремнезема. Полученные покрытия придают поверхности огнезащитные и гидрофобные свойства, а также снижают водопоглощение древесины.

Авторами [14] были получены огнестойкие, водонепроницаемые покрытия для защиты древесины. Был предложен экологичный и простой способ получения таких покрытий, при которых нелетучий полиуретан на водной основе смешивали с промышленными антипиренами.

В исследовании [15] использовались материалы из биомассы каррагинана и водорастворимый коллаген в качестве синергетических огнезащитных и дымоподавляющих агентов. С помощью ультразвуковой пропитки внедрили антипирен внутрь древесины. В результате была получена антипиренованная древесина на основе биомассы.

## Цель и задачи

Исследовать огнезащитную эффективность вновь разработанных азотфосфорсодержащих огнезащитных составов (ОЗС) для древесины, полученных путем химической деструкции отходов полиэтилентерефталата (ПЭТФ) с алифатическими аминами и без них.

Для достижения поставленной цели были определены следующие задачи:

1. Получить огнезащитные составы для древесины на основе азотсодержащих продуктов деструкции полиэтилентерефталата ди- и полиаминами и без присутствия ПЭТФ.
2. Изучить огнезащитную эффективность вновь полученных огнезащитных составов для древесины.
3. Сравнить огнезащитную эффективность огнезащитных составов, полученных с применением полиэтилентерефталата и без него.

## Материалы и методы

Для проведения эксперимента по определению огнезащитной эффективности были использованы образцы древесины сосны, обработанные огнезащитными составами. Огнезащитные составы

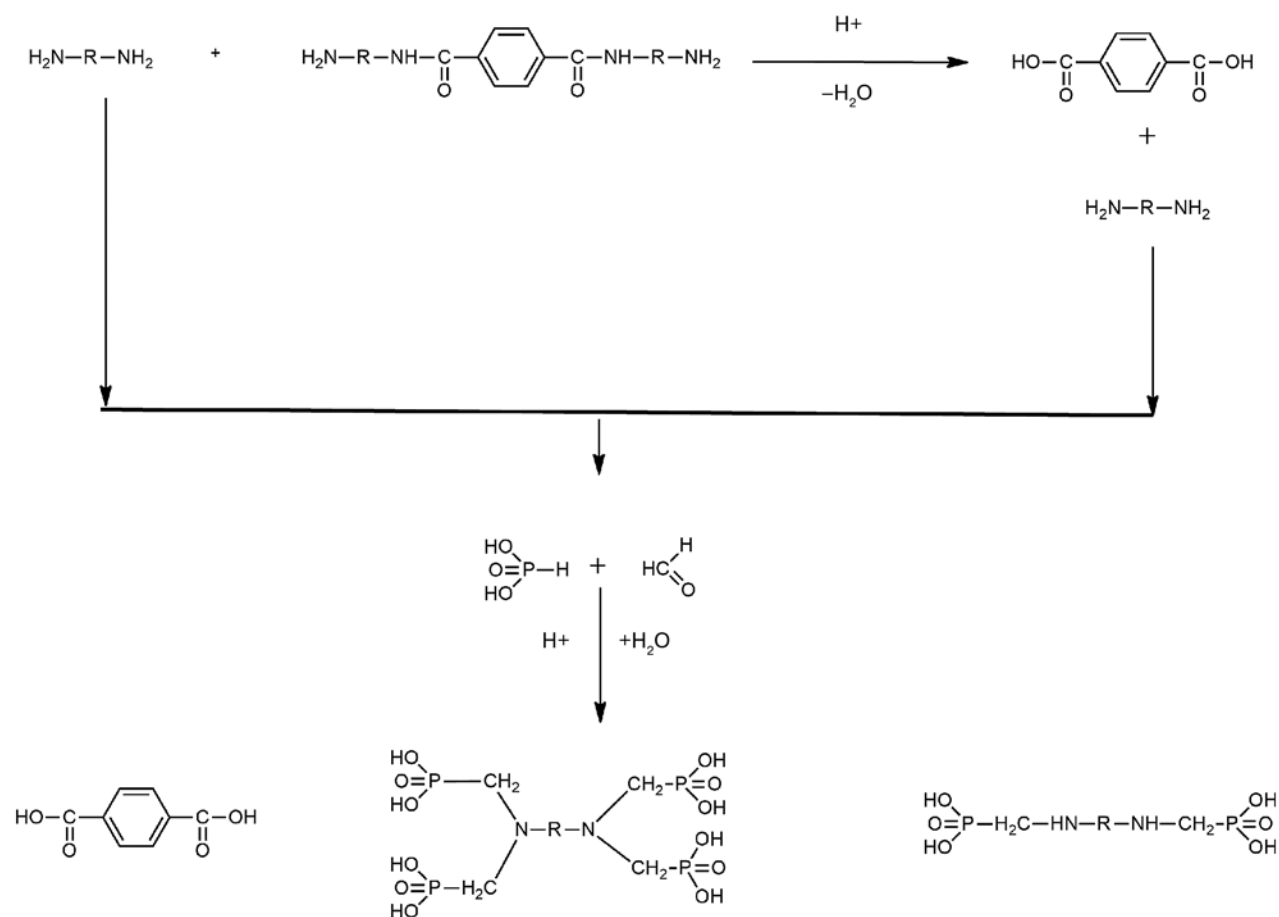


Рис. 2. Схема получения огнезащитного состава

Fig. 2. Scheme for production of fire-retardant composition

Физико-химические свойства огнезащитных составов  
Physico-chemical properties of fire-retardant compositions

Огнезащитный состав Fire-retardant composition	Внешний вид Form	Массовая доля сухого остатка, % Mass fraction of dry residue, %	Плотность, г/м <sup>3</sup> Density, g/m <sup>3</sup>	pH
ПИРИЛАКС (КО) PIRILAX (CS)	Жидкость желтого цвета Liquid yellow colour	71,0	1,210	1–2,5
ОЗС ПЭПА (ОЗС-1) FR PEPA (FR-1)	Жидкость темно-желтого цвета Liquid dark yellow colour	63,0	1,297	4
ОЗС ГМДА (ОЗС-2) FR GMDA (FR-2)	Жидкость желтого цвета Liquid yellow colour	43,5	1,204	7
ОЗС ЭДА (ОЗС-3) FR EDA (FR-3)	Жидкость коричневого цвета Brown liquid	61,0	1,198	3
ОЗС ПЭТФ – ГМДА (ОЗС-4) FR PET – HMDA (FR-4)	Жидкость светло-коричневого цвета Liquid light brown	41,7	1,160	6
ОЗС ПЭТФ – ПЭПА (ОЗС-5) FR PET – PEPA (FR-5)	Жидкость темно-коричневого цвета Liquid dark brown	46,4	1,220	7
ОЗС ПЭТФ – ЭДА (ОЗС-7) FR PET – EDA (FR-7)	Жидкость желтого цвета Liquid yellow colour	41,9	1,130	4

были получены в результате химической деструкции отходов ПЭТФ алифатическими аминами [16, 17].

Для первичной оценки огнезащитной эффективности полученных ОЗС были проведены испытания методом «огневой трубы» (рис. 1). Определялась потеря массы образцов сосны размерами 100 × 35 × 5 мм в зависимости от расхода огнезащитного покрытия под действием спиртовой горелки в течение 2 мин.

Огнезащитную эффективность образцов древесины, обработанных полученными огнезащитными составами, определяли по ГОСТ Р 53292–2009<sup>1</sup>.

### Результаты и обсуждение

Продукты аминолитиза ПЭТФ, являющиеся смесью диамидов ТФК и непрореагировавших аминов, были использованы для получения фосфорсодержащих ОЗС путем фосфорилирования продуктов аминолитиза ПЭТФ по реакции Кабачника – Филдса с получением α-аминометиленфосфоновых кислот [18]. Схема получения огнезащитных составов представлена на рис. 2.

Из литературных источников [10, 18] известно, что аммонийные соли α-аминометиленфосфоновых

кислот являются эффективными замедлителями горения древесины.

Свойства предоставленных образцов ОЗС были исследованы по следующим показателям: плотность, pH, внешний вид, массовая доля сухих веществ. Результаты исследований приведены в таблице.

Огнезащитные составы с применением чистых ди- и полиаминов имеют массовую долю сухого остатка выше, чем ОЗС, полученные путем деструкции бытовых отходов. Это, вероятно, связано с наличием продуктов аминолитиза в составе ОЗС, полученных путем деструкции отходов полиэтилентерефталата.

С целью определения оптимального расхода огнезащитных составов с максимальной огнезащитной способностью была проведена первичная оценка новых составов. Были проведены исследования по обработке древесных образцов несколькими слоями ОЗС: от 1 до 4. Для сравнения влияния поглощения ОЗС на потерю массы при горении использовали древесные материалы, пропитанные составами ОЗС-1 и ОЗС-7. В качестве контрольного использовали древесный образец (КО), пропитанный ОЗС Пирилакс [19].

На рис. 3 представлены экспериментальные данные, полученные с применением ОЗС, синтезированных путем деструкции бытовых отходов в сравнении с контрольным образцом.

Из графика видно, что огнезащитный состав на основе ПЭТФ – ПЭПА [16] наиболее эффективен

<sup>1</sup> ГОСТ Р 53292–2009. Огнезащитные составы и вещества для древесины и материалов на ее основе. Общие требования. Методы испытаний. М. : Стандартинформ. 2007.

вен, потеря массы образца составляет 15 % при расходе 100 г/м<sup>2</sup>, в то время как потеря массы контрольного образца при таком же расходе — более 40 %. Образцы, обработанные составами ПЭТФ – ГМДА и ПЭТФ – ЭДА, при расходе от 70 до 100 г/м<sup>2</sup> имеют потерю массы образца при горении более 20 %.

Для сравнения огнезащитной эффективности составов с применением чистых ди- и полиаминов и ОЗС, полученных путем деструкции бытовых отходов, была определена потеря массы древесных образцов, обработанных ОЗС, полученных по реакции фосфорилирования на основе чистых аминов (ЭДА, ГМДА, ПЭПА). Результаты исследований представлены на рис. 4.

Из графика видно, что при расходе ОЗС на основе ПЭПА и ГМДА от 25 г/м<sup>2</sup> потеря массы при горении не превышает 15 %, в то время как при расходе состава на основе ЭДА в количестве 50 г/м<sup>2</sup> потеря массы при горении составляет более 60 %. Потеря массы контрольного образца, обработанного Пирилаксом, при том же расходе (75 г/м<sup>2</sup>) превышает 50 %. Таким образом, при расходе ОЗС с применением чистых ди- и полиаминов в количестве 75 г/м<sup>2</sup> позволяет снизить потерю массы при горении до 10 %. На основании полученных экспериментальных данных можно сделать вывод, что наиболее целесообразно применять ОЗС на основе ПЭПА, так как он является доступным и дешевым сырьем по сравнению с другими аминами.

Предварительная оценка эффективности огнезащитных составов по методу «Огневая труба» показала, что применение азотфосфорсодержащих ОЗС с применением чистых ди- и полиаминов и полученных путем деструкции бытовых отходов приводит к снижению потери массы образцов древесины при горении [19].

Наиболее целесообразно применять ОЗС на основе чистого ПЭПА с расходом 100 г/м<sup>2</sup> при нанесении 2 слоев антипирена.

Для определения огнезащитной эффективности синтезированных ОЗС проведены испытания в соответствии с ГОСТ Р 53292–2009<sup>1</sup> с применением установки «Керамическая труба» (рис. 5).

Из рис. 5 видно, что огнезащитный состав с использованием ОЗС на основе ПЭТФ – ПЭПА наиболее эффективен. При расходе ОЗС 150 г/м<sup>2</sup> и более потеря массы при горении древесного образца составляет менее 9 %. С применением в качестве ОЗС раствора на основе ЭДА и ГМДА аналогичный показатель достигается при расходе 250 и 350 г/м<sup>2</sup> соответственно. Таким образом, проведенные исследования показали, что наиболее целесообразно в качестве ОЗС применять состав на основе ПЭТФ – ПЭПА. Данный состав по потере массы образцов можно отнести к 1-й группе огнезащитной эффективности.

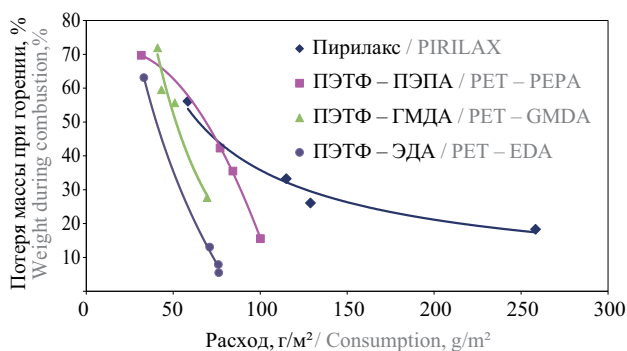


Рис. 3. Зависимость потери массы образцов ОЗС, синтезированных путем деструкции бытовых отходов от расхода ОЗС  
Fig. 3. Dependence of mass loss of FR specimens synthesized by destruction of household waste of fire-retardant consumption

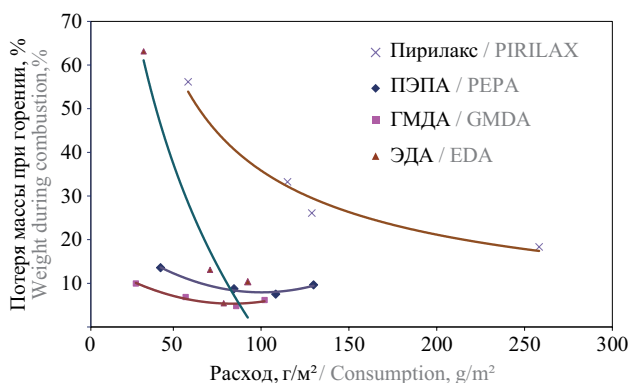


Рис. 4. Зависимость потери массы образцов ОЗС, полученных по реакции фосфорилирования на основе чистых аминов от расхода ОЗС  
Fig. 4. Dependence of mass loss of FR specimens obtained by phosphorylation reaction based on pure amines of fire-retardant consumption

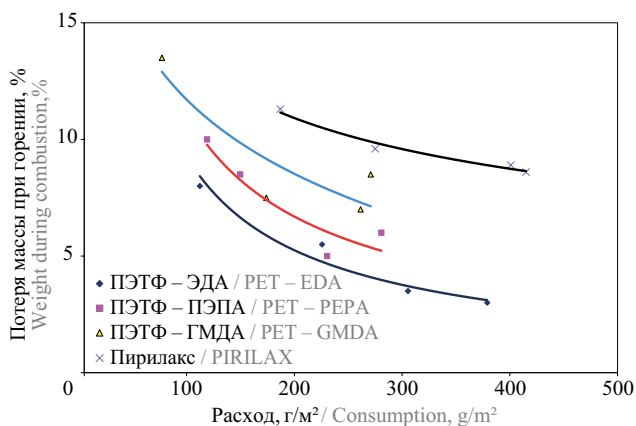
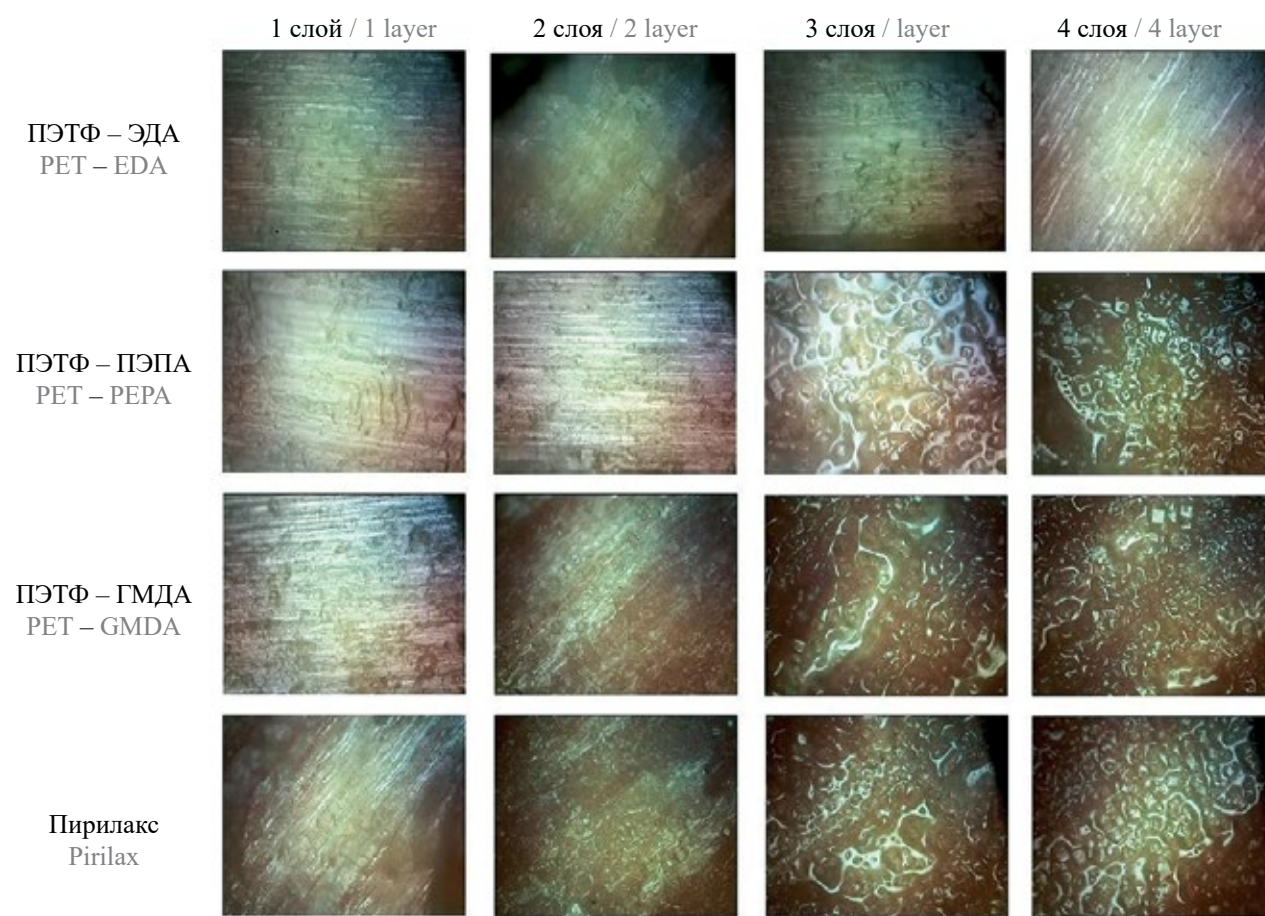


Рис. 5. Зависимость потери массы образцов от расхода ОЗС (испытания на установке «Керамическая труба»)  
Fig. 5. Dependence of mass loss of specimens on the consumption of fire-retardant composition (tests on the "Ceramic Tube" installation)

Используя металлографический микроскоп МЕТАМ ЛВ–41, исследовали структуру поверхности обработанных ОЗС образцов (рис. 6).

Из рис. 6 видно, что на поверхности древесных образцов, обработанных огнезащитными соста-





**Рис. 6.** Структура поверхности обработанных ОЗС образцов древесины  
**Fig. 6.** Surface structure of fire-retardant wood specimens

вами, полученными на основе продуктов аминотерификации полиэтилентерефталата, при нанесении 3–4 слоев образуются кристаллы. Это связано с образованием солей аммония.

### Выводы

Получены огнезащитные составы для древесины взаимодействием  $\alpha$ -метилфосфоновых кислот ди- и полиаминов с водным раствором аммиака. Проведена первичная оценка огнезащитной эффективности азотфосфорсодержащих составов для древесины, содержащих аммонийные соли  $\alpha$ -метилфосфоновых кислот и этиленгликоль, установлено, что все полученные ОЗС обладают высокой эффективностью. Испытания огнезащитных составов проводились по стандартной методике, описанной в ГОСТе<sup>1</sup>. Проведенные исследования показали, что наиболее

целесообразно в качестве ОЗС применять состав на основе ПЭТФ – ПЭПА. Данный состав по потере массы образцов можно отнести к первой группе огнезащитной эффективности.

Однако при достижении данного результата необходимо нанести 4 слоя ПЭТФ – ПЭПА и только 2 слоя ОЗС на основе чистого ПЭПА. Таким образом, с экономической точки зрения наиболее целесообразно применять ОЗС на основе чистого ПЭПА, но он не решает проблему утилизации отходов ПЭТФ.

Предварительная оценка эффективности огнезащитных составов по методу «огневая труба» показала, что применение азотфосфорсодержащих ОЗС с применением чистых ди- и полиаминов и полученных путем деструкции бытовых отходов приводит к снижению потери массы образцов древесины при горении.

### СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. *Albert Ch.M., Liew K.Ch.* Recent development and challenges in enhancing fire performance on wood and wood-based composites : a 10-year review from 2012 to 2021 // *Journal of Bioresources and Bioproducts*. 2024. Vol. 9. Issue 1. Pp. 27–42. DOI: 10.1016/j.jobab.2023.10.004

2. Газизов А.М., Ахмаров Р.Г., Абдрахманова А.И. Обоснование и подбор компонентов огнезащитного состава для древесины // Электронный научный журнал «Нефтегазовое дело». 2022. № 5. С. 5–20. DOI: 10.17122/ogbus-2022-5-5-20
3. Сафин Р.Р., Гирфанов А.А., Сафина А.В. Исследование огнезащитной эффективности деревянных конструкций различного периода эксплуатации // Системы. Методы. Технологии. 2023. № 2 (58). С. 107–112. DOI: 10.18324/2077-5415-2023-2-107-112
4. Troitzsch J.H. Fire performance durability of flame retardants in polymers and coatings // Advanced Industrial and Engineering Polymer Research. 2023. DOI: 10.1016/j.aiepr.2023.05.002
5. Rudzīte S., Bukšāns E. Impact of high-pressure impregnation and fire protective coatings on the reaction to fire performance of birch plywood // Rural Sustainability Research. 2021. No. 45 (340). Pp. 65–75. DOI: 10.2478/plua-2021-0008
6. Федотов И.О., Сивенков А.Б., Ислямбек Д.Б., Нагановский Ю.К. Термодеструктивные превращения древесины в присутствии замедлителей горения различного механизма огнезащиты. Полимерные материалы пониженной горючести : сб. мат. XI Междунар. конф. / отв. ред. М.А. Ваниев, А.Б. Сивенков. Волгоград, 2023. С. 142–146.
7. Zhang Yingnan, Jing Mingju, Zhang Muchen, Hou Shuya, Zhang Bin. Preparation and Properties of Silica Gel Foam as Fire-Retardant with High Water Retention for Wood // Fire Technology. 2022. Issue 58. No. 6. С. 3597–3621. DOI: 10.1007/s10694-022-01334-y
8. Aljamal Amer, Szolnoki Beata, Marosi Gyorgy. Improving thermal and flame-retardant properties of sorbitol-based bioepoxy systems by phosphorus-based flame retardants // Fire and Materials. 2022. Issue 46. No. 3. Pp. 605–614. DOI: 10.1002/fam.3010
9. Dong Yan, Dong Chen, Jia Tan, Liping Yuan, Zizhi Huang, Dongfang Zou et al. Synergistic flame-retardant effect of a new N-P flame retardant on poplar wood density board // Polymer Degradation and Stability. 2023. Vol. 211. P. 110331. DOI: 10.1016/j.polymdegradstab.2023.110331
10. Лунева Н.К., Онуфриева А.В., Езовитова Т.И., Шевчук В.В., Смычник А.Д. Композиция ингибитора горения древесины на основе фосфор-азотного магнийсодержащего металлокомплекса // Журнал прикладной химии. 2017. Т. 90. № 9. С. 1205–1214. EDN ZVMKAB.
11. Газизов А.М., Садыкова А.М., Садыков А.И. Пределы огнестойкости древесины в зависимости от времени пропитки // Электронный научный журнал «Нефтегазовое дело». 2023. № 4. С. 5–16. DOI: 10.17122/ogbus-2023-4-5-16. EDN YTEKNZ.
12. Покровская Е.Н. Огнезащитные покрытия с участием нанодисперсного кремнезема // Экономика строительства. 2023. № 3. С. 118–122.
13. Jinhan Lu, Peng Jiang, Zhilin Chen, Luming Lia, Yuxiang Huang. Flame retardancy, thermal stability, and hygroscopicity of wood materials modified with melamine and amino trimethylene phosphonic acid // Construction and Building Materials. 2021. Vol. 267. P. 121042. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2020.121042. EDN YIVEBA.
14. Wentao Hao, Qiannan Zheng, Yangningjie Zhonga, Xiangkun Meng, Hualin Wang, Longzhen Qiub et al. An eco-friendly and facile method to prepare waterborne polyurethane based fire-resistant & waterproof coatings for wood protection // Progress in Organic Coatings. 2023. Vol. 185. P. 107892. DOI: 10.1016/j.porgcoat.2023.107892
15. Bin Liu, Penghui Liu, Zhan Ma, Musenge Chola, Mo Chen, Hongying Guo et al. Chemical, pyrolysis, combustion properties and mechanism analysis of wood treated with biomass-based carrageenan-collagen modified ammonium polyphosphate // Surfaces and Interfaces. 2024. Vol. 46. P. 104121. DOI: 10.1016/j.surfin.2024.104121
16. Crippa M., Morico B. PET depolymerization: a novel process for plastic waste chemical recycling // Studies in Surface Science and Catalysis. 2020. Vol. 179. Pp. 215–229. DOI: 10.1016/B978-0-444-64337-7.00012-4
17. Балакин В.М., Красильникова М.А. Азотфосфорсодержащие огнезащитные составы на основе продуктов деструкции полиэтилентерефталата алифатическими ди- и полиаминами // Известия ВолГТУ. 2015. № 7 (164). С. 162–165. EDN UZBIYL.
18. Черкасов Р.А., Галкин В.И. Реакция Кабачника – Филдса: синтетический потенциал и проблема механизма // Успехи химии. 1998. Т. 67. № 10. С. 940–968. EDN MPAYIF.
19. Балакин В.М., Красильникова М.А., Стародубцев А.В., Пазникова С.Н., Ахметов Т.И., Целоусов Д.В. и др. Сравнительная оценка огнезащитных свойств фосфорсодержащих антипиренов на основе продуктов аминолита полиэтилентерефталата // Пожаровзрывобезопасность/Fire and explosion safety. 2013. Т. 22. № 4. С. 29–32.

## REFERENCES

1. Albert Ch.M., Liew K.Ch. Recent development and challenges in enhancing fire performance on wood and wood-based composites : a 10-year review from 2012 to 2021. *Journal of Bioresources and Bioproducts*. 2024; 9(1):27-42. DOI: 10.1016/j.jobab.2023.10.004
2. Gazizov A.M., Akhmarov R.G., Abdrakhmanova A.I. Justification and selection of components of fire protection composition for wood. *Electronic scientific journal "Oil and Gas Business"*. 2022; 5:5-20. DOI: 10.17122/ogbus-2022-5-5-20 (rus).
3. Safin R.R., Girfanov A.A., Safina A.V. Investigation of fire-retardant effectiveness of wooden structures during various periods of operation. *Systems. Methods. Technologies*. 2023; 2(58):107-112. DOI: 10.18324/2077-5415-2023-2-107-112 (rus).
4. Troitzsch J.H. Fire performance durability of flame retardants in polymers and coatings. *Advanced Industrial and Engineering Polymer Research*. 2023. DOI: 10.1016/j.aiepr.2023.05.002
5. Rudzīte S., Bukšāns E. Impact of high-pressure impregnation and fire protective coatings on the reaction to fire performance of birch plywood. *Rural Sustainability Research*. 2021; 45(340):65-75. DOI: 10.2478/plua-2021-0008
6. Fedotov I.O., Sivenkov A.B., Islyabmek D.B., Naganovskiy Yu.K. *Thermal-destructive transformations of wood in the presence of flame retardants of various fire protection mechanisms. Polymer materials of low flammability : collection of materials of the XI International Conference / ed. M.A. Vaniyev, A.B. Sivenkov*. 2023; 142-146 (rus).
7. Zhang Yingnan, Jing Mingju, Zhang Muchen, Hou Shuya, Zhang Bin. Preparation and Properties of Silica Gel Foam as Fire-Retardant with High Water Retention for Wood. *Fire Technology*. 2022; 58(6):3597-3621. DOI: 10.1007/s10694-022-01334-y
8. Aljamal Amer, Szolnoki Beata, Marosi Gyorgy. Improving thermal and flame-retardant properties of sorbitol-based bio-epoxy systems by phosphorus-based flame retardants. *Fire and Materials*. 2022; 46(3):605-614. DOI: 10.1002/fam.3010
9. Dong Yan, Dong Chen, Jia Tan, Liping Yuan, Zizhi Huang, Dongfang Zou et al. Synergistic flame-retardant effect of a new N-P flame retardant on poplar wood density board. *Polymer Degradation and Stability*. 2023; 211:110331. DOI: 10.1016/j.polymdegradstab.2023.110331
10. Luneva N.K., Onufriyeva A.V., Yezovitova T.I., Shevchuk V.V., Smychnik A.D. Wood combustion inhibitor composition based on phosphorus-nitrogen magnesium-containing metal complex. *Journal of Applied Chemistry*. 2017; 90(9):1205-1214. EDN ZVMKAB. (rus).
11. Gazizov A.M., Sadykova A.M., Sadykov A.I. Fire resistance limits of wood depending on impregnation time. *Electronic scientific journal "Oil and Gas Business"*. 2023; 4:5-16. DOI: 10.17122/ogbus-2023-4-5-16. EDN YTEKNZ. (rus).
12. Pokrovskaya E.N. Fire-protective coatings with nanodispersed silica. *Construction Economics*. 2023; 3(118-122). (rus).
13. Jinhan Lu, Peng Jiang, Zhilin Chen, Luming Lia, Yuxiang Huang. Flame retardancy, thermal stability, and hygroscopicity of wood materials modified with melamine and amino trimethylene phosphonic acid. *Construction and Building Materials*. 2021; 267:121042. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2020.121042. EDN YIVEBA.
14. Wentao Hao, Qiannan Zheng, Yangningjie Zhonga, Xiangkun Meng, Hualin Wanga, Longzhen Qiub et al. An eco-friendly and facile method to prepare waterborne polyurethane based fire-resistant & waterproof coatings for wood protection. *Progress in Organic Coatings*. 2023; 185:107892. DOI: 10.1016/j.porgcoat.2023.107892
15. Bin Liu, Penghui Liu, Zhan Ma, Musenge Chola, Mo Chen, Hongying Guo et al. Chemical, pyrolysis, combustion properties and mechanism analysis of wood treated with biomass-based carrageenan-collagen modified ammonium polyphosphate. *Surfaces and Interfaces*. 2024; 46:104121. DOI: 10.1016/j.surfin.2024.104121
16. Crippa M., Morico B. PET depolymerization: a novel process for plastic waste chemical recycling. *Studies in Surface Science and Catalysis*. 2020; 179:215-229. DOI: 10.1016/B978-0-444-64337-7.00012-4
17. Balakin V.M., Krasilnikova M.A. Nitrogen-phosphorus-containing fire-retardant compositions based on the products of polyethylene terephthalate destruction by aliphatic di- and polyamines. *VolGTU news*. 2015; 7(164):162-165. EDN UZBIYL. (rus).
18. Cherkasov R.A., Galkin V.I. Kabachnik – Fields reaction: synthetic potential and the problem of mechanism. *Advances in Chemistry*. 1998; 67(10):940-968. EDN MPAYIF. (rus).
19. Balakin V.M., Krasilnikova M.A., Starodubtsev A.V., Paznikova S.N., Akhmetov T.I., Tselousov D.V. et al. Comparative assessment of fire-protective properties of phosphorus-containing fire retardants based on polyethylene terephthalate aminolysis products. *Pozharovzryvobezopasnost/Fire and explosion safety*. 2013; 22(4):29-32. (rus).

Поступила 08.04.2024, после доработки 02.02.2025;  
принята к публикации 04.02.2024

Received April 8, 2024; Received in revised form February 2, 2025;

Accepted February 4, 2025

**Информация об авторах**

**КРАСИЛЬНИКОВА Маргарита Александровна**, научный сотрудник научно-исследовательского отдела, Уральский институт Государственной противопожарной службы Министерства Российской Федерации по делам гражданской обороны, чрезвычайным ситуациям и ликвидации последствий стихийных бедствий, Россия, 620062, г. Екатеринбург, ул. Мира, 22; AuthorID: 656764; ResearcherID: 56685388300; ORCID: 0000-0002-3103-4719; e-mail: krasilnikova79@mail.ru

**БАРБИН Николай Михайлович**, д.т.н., доцент, ведущий научный сотрудник учебно-научного комплекса пожаротушения и проведения аварийно-спасательных работ, Уральский институт Государственной противопожарной службы Министерства Российской Федерации по делам гражданской обороны, чрезвычайным ситуациям и ликвидации последствий стихийных бедствий, Россия, 620062, г. Екатеринбург, ул. Мира, 22; AuthorID: 31647; ResearcherID: 6701448034; ORCID: 0000-0002-6709-4334; e-mail: nmbarbin@mail.ru

**Вклад авторов:**

**Красильникова М.А.** — постановка целей и задач научного исследования; подборка методик, в соответствии с которыми проводилось научное исследование; участие в получении и обработке экспериментального материала.

**Барбин Н.М.** — научное руководство; концепция исследования; доработка текста; итоговые выводы.

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

**Information about the authors**

**Margarita A. KRASILNIKOVA**, Researcher of the Research Department, 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, Ekaterinburg, 620062, Russian Federation; AuthorID: 656764; Researcher ID: 56685388300; ORCID: 0000-0002-3103-4719; e-mail: krasilnikova79@mail.ru

**Nikolay M. BARBIN**, Dr. Sci. (Eng.), Associate Professor, Leading researcher of the educational and scientific complex of fire extinguishing and emergency rescue operations, 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, Ekaterinburg, 620062, Russian Federation; AuthorID: 31647; ResearcherID: 6701448034; ORCID: 0000-0002-6709-4334; e-mail: nmbarbin@mail.ru

**Contribution of the authors:**

**Krasilnikova M.A.** — setting the goals and objectives of the scientific research; selection of methods, according to which the scientific research was conducted; participation in obtaining and processing of experimental material.

**Barbin N.M.** — scientific guidance; research concept; finalization of the text, final conclusions.

The authors declare that there is no conflict of interest.



## Свойства и фазовый состав силикатных наполнителей, полученных на основе различных продуктов переработки рисовой шелухи

Алла Германовна Соколова<sup>1</sup>✉, Камиль Радикович Габдулхаев<sup>2</sup>, Елена Михайловна Готлиб<sup>2</sup>

<sup>1</sup> Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет, г. Москва, Россия

<sup>2</sup> Казанский национальный исследовательский технологический университет, г. Казань, Россия

### АННОТАЦИЯ

**Введение.** Утилизация рисовой шелухи (РШ), многотоннажного отхода сельскохозяйственного производства, имеет практический интерес, поскольку на ее основе перспективно синтезировать волластонит- и диопсид-содержащие наполнители. Фазовый состав и свойства этих кальций-магниевого силикатов (КМС), получаемых методом твердофазного синтеза, будут зависеть от содержания в производных рисовой шелухи аморфного диоксида кремния, их пористости, кислотно-основных характеристик поверхности и других показателей.

**Цель исследования.** Оценить влияние способа получения диоксида кремния из рисовой шелухи на состав и свойства синтезируемых на его основе силикатов.

**Материалы и методы исследования.** В работе исследованы производные переработки рисовой шелухи: зола рисовой шелухи, полученная при 500 °С в лабораторных условиях, и промышленная карбонизированная рисовая шелуха. Рентгенографический количественный анализ (РКФА) проводился на дифрактометре Rigaku SmartLab. Удельную площадь поверхности пор определяли по методу низкотемпературной адсорбции азота на приборе Quantachrome Nova 1200e. pH водной вытяжки образцов определяли с помощью комбинированного измерителя «SevenMulti» по ГОСТ 21119.3–91. Содержание углерода оценивали на элементном анализаторе «СКИС 5Е-СНН 2200».

**Результаты и обсуждение.** Зола рисовой шелухи, полученная в лабораторных условиях, и промышленная карбонизированная РШ существенно отличаются по пористости, и КМС на их основе имеют различный фазовый состав. Большой выход диопсида при применении обоих производных РШ имеет место при избытке доломита. Однако при использовании промышленного образца в составе полученного силиката, помимо диопсида, содержится волластонит, и этот КМС отличается повышенной пористостью структуры.

**Выводы.** При применении более пористого промышленного диоксида кремния синтезированный твердофазным методом силикат содержит волластонит, который отсутствует в составе конечного продукта на основе полученной в лабораторных условиях золы рисовой шелухи. Все синтезированные силикаты содержат кристаллические диоксиды кремния, концентрация которых выше при большей доле кремний-содержащего компонента в шихте.

**Ключевые слова:** фазовый состав; пористость; синтетический диопсид; волластонит; рисовая шелуха; твердофазный синтез; кристобалит

**Для цитирования:** Соколова А.Г., Габдулхаев К.Р., Готлиб Е.М. Свойства и фазовый состав силикатных наполнителей, полученных на основе различных продуктов переработки рисовой шелухи // Пожаровзрывобезопасность/ Fire and Explosion Safety. 2025. Т. 34. № 1. С. 32–39. DOI: 10.22227/0869-7493.2025.34.01.32-39

✉ Соколова Алла Германовна, e-mail: as.falconi@yandex.ru

## Properties and phase composition of silicate fillers obtained on the basis of different rice husk processing products

Alla G. Sokolova<sup>1</sup>✉, Kamil R. Gabdulkhayev<sup>2</sup>, Elena M. Gotlib<sup>2</sup>

<sup>1</sup> Moscow State University of Civil Engineering (National Research University), Moscow, Russian Federation

<sup>2</sup> Kazan National Research Technological University, Kazan, Russian Federation

### ABSTRACT

**Introduction.** Utilization of rice husk (RH), a multi-tonnage waste product of agricultural production, is of practical interest as synthesis of wollastonite and diopside-containing fillers on its base has great prospects. Phase

composition and properties of these calcium and magnesium silicates (CMS) obtained by the method of solid phase synthesis will depend on the content of amorphous silicon dioxide in the products, their porosity, acid-base properties of surface, and others.

**The aim of the research.** To evaluate the impact of the method of obtaining silicon dioxide from RH on the properties and phase composition of silicates synthesized on its base.

**Materials and methods of the research.** In the work, the derivatives of rice husk processing were investigated: rice husk ash obtained in the laboratory conditions at 500 °C and industrial carbonized rice husk. X-ray diffraction quantitative analysis was carried out on the Rigaku SmartLab diffractometer. Specific pore surface was assessed by the method of low-temperature adsorption on the Quantachrome Nova 1200e apparatus. The pH of the aqueous extract of the specimens was evaluated by the combined measuring device solutions "SevenMulti" under the no GOST 21119.3–91. The carbon content was estimated on the element analyzer "CKIS 5E-CHN 2200".

**Results and discussion.** Rice husk ash produced in the laboratory conditions at the temperature 500 °C and industrial carbonized RH are substantially different in porosity, while CMS on their base have different phase composition. Considering both derivatives of RH, the largest yield of diopside occurs at the excess amount of dolomite. However, when the industrial specimen is used, the composition of obtained silicate also contains wollastonite, apart from diopside, and such CMS is characterized by the increased porosity of structure.

**Conclusions.** At the application of more porous industrial silicon dioxide synthesized by solid phase method, the silicate contains wollastonite, which is absent in the composition of the final product on the base of rice husk ash obtained in the laboratory conditions. All synthesized silicates contain crystalline silicon dioxides. The higher the content of silicon components in the stock charge, the greater the concentration of silicon dioxides.

**Keywords:** phase composition; porosity; synthetic diopside; wollastonite; rice husk; solid phase synthesis; cristobalite

**For citation:** Sokolova A.G., Gabdulkhayev K.R., Gotlib E.M. Properties and phase composition of silicate fillers obtained on the basis of different rice husk processing products. *Pozharovzryvbezopasnost/Fire and Explosion Safety*. 2025; 34(1):32–39. DOI: 10.22227/0869-7493.2025.34.01.32–39 (rus).

✉ Alla Germanovna Sokolova, e-mail: as.falconi@yandex.ru

## Введение

Одним из путей снижения материалоемкости производства продукции и улучшения его экологичности является повышение степени утилизации различных видов крупнотоннажных отходов, что экономически выгодно и технически осуществимо [1]. Данная задача соответствует новой модели производства и потребления — экономике замкнутого цикла, которая подразумевает переработку, повторное использование и восстановление материалов и продуктов. В этой связи становится актуальным использование в том числе продуктов «зеленой» химии, которые сокращают или полностью исключают использование и образование опасных веществ и применяют устойчивые и эффективные реакции, минимизирующие отходы, использование энергии и уменьшающие воздействие на окружающую среду.

В частности, практический интерес имеет грамотная утилизация рисовой шелухи или лузги (РШ), основой которой должен быть анализ путей ее переработки и регулирования свойств получаемых продуктов [2]. В 2024 г. российские производители добились рекордного урожая риса в 1,2 млн тонн, что на 17 % превышает уровень 2023 г. Следует отметить, что за последние два десятилетия сбор рисовой культуры в Российской Федерации возрос в 2,7 раза. Поскольку рисовая шелуха составляет около 20 % от массы производимого зерна, объемы отходов представляют собой серьезную проблему для экономики. Рисовая шелуха состоит из целлюлозы (50 %), лигнина (25–30 %), кремне-

зема (15–20 %) и влаги (10–15 %). Ввиду высокого содержания кремнезема рисовая шелуха практически не подвергается естественному биологическому разложению, накапливаясь в полигонах, становится серьезным загрязнителем окружающей среды и превращается в трудноразлагаемый отход [3].

В последние годы отходы рисового производства привлекают большое внимание исследователей [4, 5]. Рисовая шелуха и продукты ее переработки используются как заполнители и наполнители для бетона в качестве более дешевой альтернативы мелкого кремнезема, абсорбента для масел и синтетических веществ, мелиорантов почвы, в качестве изоляционных материалов при производстве холодильников, а также в сталелитейной отрасли в виде изоляционного порошка.

Однако влияние метода получения конечного продукта из отходов рисового производства на свойства и эффективность получаемых силикатов недостаточно изучено [6]. Основным способом переработки рисовой шелухи является ее сжигание с получением золы рисовой шелухи (ЗРШ), а также синтетического волластонита и диопсида на ее основе [7, 8]. Их фазовый состав и свойства при использовании твердофазного метода получения будут зависеть от содержания в производных рисовой шелухи аморфного диоксида кремния и их других характеристик. Нагревание золы до достаточно высоких температур приводит к удалению несгоревшего углерода и ее кристаллизации, сопровождающейся переходом диоксида кремния в кристобалит или тримит.

В этой связи была поставлена **цель исследования** — оценить влияние способа получения диоксида кремния из рисовой шелухи на состав и свойства синтезируемых на его основе кальций-магневых силикатов (КМС).

Для достижения указанной цели были поставлены следующие задачи:

- определить фазовый состав золы рисовой шелухи, полученной в лабораторных условиях сжиганием при температуре 500 °С, и промышленной карбонизированной рисовой шелухи и произвести сравнительный анализ содержания в них аморфного кремнезема и углерода;
- оценить показатели пористости и кислотно-основные характеристики поверхности производных рисовой шелухи;
- синтезировать кальций-магневые силикаты на основе доломита и производных рисовой шелухи методом изотермической выдержки с различным составом шихты;
- оценить фазовый состав и показатели пористости синтезированных кальций-магневых силикатов высокоинформативными методами и выявить зависимость данных свойств от состава шихты;
- на основе полученных данных определить возможные области применения кальций-магневых силикатов в производстве строительных материалов.

### Материалы и методы исследования

В качестве источника аморфного диоксида кремния изучались: зола рисовой шелухи (ЗРШ<sub>500</sub>), полученная в лабораторных условиях термообработкой РШ в течение 3 ч при 500 °С, и промышленная карбонизированная рисовая шелуха (ПКРШ), производимая на установке по ТУ 38.21.40-003-42457266–2021<sup>1</sup> [9].

При получении ПКРШ рисовая шелуха с помощью конвейеров направляется в пиролизные печи, в которых она перемещается по каналам с помощью транспортировочного механизма при нагреве до 600 °С без доступа кислорода с активным выделением пиролизных газов, которые отводятся через специальный канал. Далее зола РШ транспортируется на установку дожигания [9].

В качестве источника оксидов кальция и магния применялся доломит (ГОСТ 23672–2020<sup>2</sup>), а для

<sup>1</sup> ТУ 38.21.40-003-42457266–2021. Установка получения золошлаковой смеси при утилизации золы и остатков от термической деструкции (сжигания) отходов. URL: <https://docs.cntd.ru/document/1300836738>

<sup>2</sup> ГОСТ 23672–2020. Межгосударственный стандарт. Доломит для стекольной промышленности. Технические условия (дата введения: 01.03.2021).



**Рис. 1.** Измерительное оборудование Комплексной лаборатории «НаноАналитика», КНИТУ, Казань: *a* — дифрактометр Rigaku SmartLab; *b* — измеритель комбинированный SevenMulti S47-K с модулями pH/ОВП и УЭП  
Fig. 1. Measuring equipment of the Integrated Laboratory «NanoAnalytics», KNITU, Kazan: *a* — Rigaku SmartLab diffractometer; *b* — SevenMulti S47-K combination meter with pH/ORP and SEC modules

уменьшения энергоемкости процесса твердофазного синтеза КМС, в качестве плавня [10] использована 5%-ная борная кислота (ГОСТ 18704–78<sup>3</sup>).

Кальций-магневые силикаты получали [11] при изотермической выдержке исходных компонентов при температуре 1100 °С в течение 3 ч.

Рентгенографический количественный анализ (РКФА) проводился на многофункциональном дифрактометре Rigaku SmartLab Комплексной лаборатории «НаноАналитика» (рис. 1, *a*) при параметрах съемки: угловой интервал  $2\theta$  от 3 до 65 ° с шагом сканирования 0,02, с экспозицией 1 с в точке.

pH водной вытяжки образцов определяли с помощью комбинированного измерителя «SevenMulti» (рис. 1, *b*) по ГОСТ 21119.3–91<sup>4</sup>.

Определение удельной площади поверхности проводилось с применением метода низкотемпературной адсорбции азота на приборе Quantachrome Nova 1200e (рис. 2). Пробоподготовка образцов проводилась при температуре 150 °С, 3 ч, при давлении в вакууме 2 Па. При определении удельной площади поверхности по методу ВЕТ использовалось ISO 9277:2010<sup>5</sup>, при анализе распределения мезопор ISO 15901-2:2006<sup>6</sup>.

Содержание углерода оценивали на элементном анализаторе «СКИС 5E-CHN 2200».

<sup>3</sup> ГОСТ 18704–78. Кислота борная. Технические условия (дата введения: 01.01.80).

<sup>4</sup> ГОСТ 21119.3–91. Общие методы испытаний пигментов и наполнителей. Определение pH водной суспензии (дата введения: 01.01.93).

<sup>5</sup> ISO 9277:2010. Международный стандарт. Определение удельной площади поверхности дисперсных и пористых материалов методом газовой адсорбции. Метод Брунауэра, Эммета и Теллера (ВЕТ метод).

<sup>6</sup> ISO 15901-2:2006. International standard. Pore size distribution and porosity of solid materials by mercury porosimetry and gas adsorption.



**Рис. 2.** Анализатор размера пор и площади поверхности NOVA 1200 (QUANTACHROME)

**Fig. 2.** NOVA 1200 pore size and surface area analyzer (QUANTACHROME)

### Результаты и обсуждение

В результате проведенных исследований были установлены фазовые составы золы рисовой шелухи, полученной в лабораторных условиях путем обжига РШ при 500 °С, и промышленной карбонизированной рисовой шелухи (табл. 1).

Таким образом, ЗРШ, полученная из рисовой шелухи (РШ) при 500 °С, содержит 97 % аморфного диоксида кремния, а ПКРШ является полностью аморфной (табл. 1).

Эти силикаты несколько отличаются содержанием органической фазы (табл. 1), которая у ПКРШ немного больше, чем у золы, полученной при 500 °С, что также может оказывать определенное влияние на процесс обжига их с доломитом. Зола рисовой шелухи, как и ПКРШ, имеет щелочную природу поверхности (табл. 2). В то же время эти силикаты существенно отличаются по пористости. У ПКРШ общий объем пор почти в 3 раза больше, она имеет средний диаметр пор, в 3,6 раза больший,

**Таблица 1.** Фазовый состав продуктов переработки рисовой шелухи и содержание в них углерода

**Table 1.** Phase composition of rice husk products and their carbon content

Фазовый состав, % Phase composition, %	Силикат / Silicate	
	ЗРШ <sub>500</sub> RHA <sub>500</sub>	ПКРШ ICRH
Рентгеноаморфная фаза X-ray amorphous phase	97	100
Кристаллит Cristobalite	2	0
Кварц Quartz	1	0
Содержание углерода, % Carbon content, %	3,94	4,64

и в 2,1 раза большую удельную поверхность пор (табл. 2) по сравнению с ЗРШ<sub>500</sub>.

При использовании всех производных РШ больший выход диоксида наблюдается при избытке доломита в шихте (табл. 3) вследствие распада этого кальций-магниевого карбоната с выделением углекислого газа [12, 13] в процессе высокотемпературного обжига компонентов.

Силикаты, полученные на основе ПКРШ, имеют достаточно однородный фазовый состав и независимо от соотношения аморфного диоксида кремния и доломита содержат только диопсид, волластонит и кристобалит (табл. 3). Содержание кристобалита в конечном продукте закономерно снижается с ростом концентрации доломита в шихте, так как аморфная ПКРШ расходуется на реакцию с ним.

Содержание волластонита в продукте твердофазной реакции больше при равном содержании ПКРШ и кальций-магниевого карбоната (табл. 3).

При использовании полученной в лабораторных условиях золы рисовой шелухи фазовый состав продуктов твердофазного синтеза существенно отличается от применения ПКРШ (табл. 4). Так, КМС не содержит волластонит, и наибольшее содержание в нем диоксида выше, чем при применении ЗРШ<sub>500</sub>.

**Таблица 2.** Характеристики пористости структуры и pH водных дисперсий производных РШ

**Table 2.** Characteristics of porosity structure and pH of aqueous dispersions of RH derivatives

Силикат Silicate	Общий объем пор по ВЖН, см <sup>3</sup> /г Total pore volume by BJH, cm <sup>3</sup> /g	Средний диаметр пор по ВЖН, нм Average pore diameter by BJH, nm	Удельная поверхность пор по БЭТ, м <sup>2</sup> /г BET specific pore surface, m <sup>2</sup> /g	pH водной суспензии pH of aqueous suspension
ЗРШ <sub>500</sub> RHA <sub>500</sub>	0,08	4,1	27,8	9,1
ПКРШ ICRH	0,22	14,8	59,3	9,9



**Таблица 3.** Фазовый состав и пористость образцов КМС в зависимости от соотношения ПКРШ и доломита в шихте  
**Table 3.** Phase composition and porosity of CMS specimens depending on the ratio of ICRH and dolomite in the charge

Состав шихты, % Charge composition, %	Фазовый состав, % Phase composition, %	Средний диаметр пор, нм Average pore diameter, nm	Удельная поверхность пор (БЭТ), м <sup>2</sup> /г Specific pore surface area (BET), m <sup>2</sup> /g	Удельный объем пор, см <sup>3</sup> /г Specific pore volume, cm <sup>3</sup> /g
Доломит — 52,0; ПКРШ — 43,0 Dolomite — 52.0; ICRH — 43.0	Диопсид — 81,5; Кристаллит — 4,7; Волластонит — 13,8 Diopside — 81.5; Cristobalite — 4.7; Wollastonite — 13.8	12,93	5,50	0,017
Доломит — 47,0; ПКРШ — 47,5 Dolomite — 47.0; ICRH — 47.5	Диопсид — 70,5; Кристаллит — 12,7; Волластонит — 16,8 Diopside — 70.5; Cristobalite — 12.7; Wollastonite — 16.8	11,33	6,05	0,017
Доломит — 43,0; ПКРШ — 52,0 Dolomite — 43.0; ICRH — 52.0	Диопсид — 66,2; Кристаллит — 18,4; Волластонит — 15,4 Diopside — 66.2; Cristobalite — 18.4; Wollastonite — 15.4	7,77	10,46	0,020

**Таблица 4.** Фазовый состав синтетического диопсид содержащего наполнителя, полученного при разных соотношениях ЗРШ<sub>500</sub>:Доломит  
**Table 4.** Phase composition of synthetic diopside containing filler obtained at different ratios of RHA<sub>500</sub>:Dolomite

Состав шихты, % Charge composition, %	Фазовый состав, % Phase composition, %	Средний диаметр пор, нм Average pore diameter, nm	Удельная поверхность (БЭТ), м <sup>2</sup> /г Specific pore surface area (BET), m <sup>2</sup> /g	Удельный объем пор, см <sup>3</sup> /г Specific pore volume, cm <sup>3</sup> /g
Доломит — 52,0; ЗРШ <sub>500</sub> — 43,0 Dolomite — 52.0; RHA <sub>500</sub> — 43.0	Диопсид — 95; Кристаллит — 4; Тридимит — 1 Diopside — 95; Cristobalite — 4; Tridymite — 1	4,11	1,86	0,001
Доломит — 47,5; ЗРШ <sub>500</sub> — 47,5 Dolomite — 47.5; RHA <sub>500</sub> — 47.5	Диопсид — 65; Тридимит — 35 Diopside — 65; Tridymite — 35	3,29	1,34	0,003
Доломит — 43,0; ЗРШ <sub>500</sub> — 52,0 Dolomite — 47.5; RHA <sub>500</sub> — 47.5	Диопсид — 61; Кристаллит — 14; Тридимит — 24 Diopside — 61; Cristobalite — 14; Tridymite — 24	3,96	1,47	0,0025

В то же время при недостатке доломита в шихте происходит кристаллизация аморфного диоксида кремния. Следовательно, фиксируется большее количество его кристаллических модификаций (до 30 % доли получаемого силиката). Обращает внимание существенно меньшая пористость КМС на основе ЗРШ<sub>500</sub>, чем ПКРШ (табл. 3, 4). Объем пор получаемого силиката в случае применения лабораторного образца золы рисовой шелухи на порядок меньше, как и их удельная поверхность и средний размер пор.

В научной литературе отсутствуют данные о влиянии пористости компонентов на вязкость их расплава в процессе твердофазной реакции. Однако можно предположить, что более высокая пористость ПКРШ будет оказывать влияние на эффективность ее взаимодействия с доломитом [14, 15].

Кальций-магниево-силикаты, полученные на основе двух описанных продуктов переработки рисовой шелухи, представляют интерес как наполнители полимеров и бетона, керамической плитки, фар-

фора и т.д. [16–18]. При этом есть сведения [19, 20] о синергическом эффекте волластонита и диопсида при применении их в качестве наполнителей строительных материалов.

### Заключение

Изученные в работе силикаты — продукты переработки рисового производства — преимущественно состоят из аморфного диоксида кремния, но отличаются по составу органической фазы. Обе золы рисовой шелухи, промышленная карбонизированная и полученная в лабораторных условиях, имеют щелочную природу поверхности, но существенно отличаются по показателю пористости. Соответственно, данные различия в свойствах основного компонента шихты оказывают влияние на свойства синтезированных кальций-магниевого силикатов.

Так, установлено, что при использовании обоих изученных производных РШ больший выход диопсида наблюдается при избытке доломита в шихте вследствие распада этого кальций-магниевого карбоната с выделением углекислого газа. В случае применения существенно более пористого промышленного диоксида кремния синтезированный твердофазным методом силикат содержит волластонит, который отсутствует в составе конечного продукта на основе полученной в лабораторных условиях золы рисовой шелухи. Все синтезированные силикаты содержат кристаллические диоксиды кремния, концентрация которых выше при большей доле кремнийсодержащего компонента в шихте.

Кальций-магниевого силикаты, синтезированные методом твердофазного синтеза из доломита и золы рисовой шелухи, могут быть использованы как наполнители бетона, композитных полимерных материалов, в производстве керамических изделий и т.д.

### СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Лобачева Г.К., Желтобрюхов В.Ф. Состояние вопроса об отходах и современных способах их переработки : уч. пособие. Волгоград : Изд-во ВолГУ, 2005. 176 с.
2. Suhot M.A., Hassan M., Aziz S.A., Daud M.Yu.M. Recent Progress of Rice Husk Reinforced Polymer Composites // *Polymers (Basel)*. 2021. No. 13 (15). P. 2391. DOI: 10.3390/polym13152391
3. Morimoto K., Tsuda K., Mizuno D. Literature review on the utilization of rice husks: focus on application of materials for digital fabrication // *Materials*. 2023. No. 16 (16). P. 5597. DOI: 10.3390/ma16165597
4. Rohani A.B., Rosiyah Y., Seng N.G. Production of High Purity Amorphous Silica from Rice Husk // *Procedia Chemistry*. 2016. Vol. 19. Pp. 189–195. DOI: 10.1016/j.proche.2016.03.092
5. Готлиб Е.М., Зенитова Л.А. Отходы рисопереработки — перспективное сырье для химической промышленности : монография. Ч. 2. Полимерные композиционные материалы, наполненные продуктами рисопереработки. Казань : Отечество, 2023. 100 с.
6. Gotlib E.M., Sokolova A.G., Zenitova L.A., Galimov E.R., Valeeva A.R. Epoxy and polyvinylchloride materials with fillers derived from rice waste // *E3S Web of Conferences*. 2024. Vol. 533. P. 01001. DOI: 10.1051/e3sconf/202453301001
7. Nicoara A.I., Alecu A.E., Balaceanu G.C., Puscasu E.M., Vasile B.S., Trusca R. Fabrication and characterization of porous diopside/akermanite ceramics with prospective tissue // *Engineering Applications Materials*. 2023. Vol. 16 (16). P. 5548. DOI: 10.3390/ma16165548
8. Hamisah I., Roslinda S., Muhammad A.H., Azman J. Synthesis and characterization of nano — wollastonite from rice husk ash and limestone // *Materials Science Forum*. 2013. Vol. 756. No. 5. Pp. 43–47. DOI: 10.4028/www.scientific.net/MSF.756.43
9. Ramphueiphad S., Homchat K. The continuous carbonisation of rice husk for high yield charcoal production // *SSRN Electronic Journal*. 2022. DOI: 10.2139/ssrn.4052344
10. Козубов М.П., Хохлов Е.В., Исламова Г.Г., Готлиб Е.М., Габдулхаев К.Р. Получение аморфного диоксида кремния в промышленных условиях на базе рисовой шелухи // *Технологии переработки отходов с получением новой продукции : мат. V Всеросс. науч.-практ. конф. Киров, 2023. С. 86–89. EDN QOHQGI*.
11. Твердов И.Д., Готлиб Е.М., Ницуму Р.Ш., Ямалеева Е.С. Диопсид как наполнитель эпоксидных полимеров // *Южно-Сибирский научный вестник*. 2023. № 4. С. 11–15. DOI: 10.25699/SSSB.2023.50.4.017. EDN JYNKJY.
12. Твердов И.Д., Готлиб Е.М., Ямалеева Е.С., Холин К.В., Султанов Т.П. Изучение фазовых превращений в процессе твердофазного синтеза диопсида на основе золы рисовой шелухи // *Вестник Воронежского государственного университета инженерных технологий (ВГУИТ)*. 2024. Т. 86. № 2. С 55–58. DOI: 10.20914/2310-1202-2024-2-277-283
13. Mishagin K.A., Yamaleeva E.S., Gotlib E.M., Sokolova A.G., Pirogova N.N. The impact of calcium silicate obtained from zeolite-siliceous rock on properties of ceramic materials // *Construction Economics*. 2024. No. 10. Pp. 433–435.

14. Mukri B.D., Krushnamurty K., Chowdhury A., Suryakala D., Subrahmanyam C. Alkali-treated carbonized rice husk for the removal of aqueous Cr(IV) // *BioResources*. 2016. No. 11 (4). Pp. 9175–9189.
15. Soltani N., Bahrami A., Pech-Canul M.I., Gonzalez L.A. Review on the physicochemical treatments of rice husk for production of advanced materials // *Chemical Engineering Journal*. 2015. Vol. 264. Pp. 899–935. DOI: 10.1016/j.cej.2014.11.056
16. Верещагин Г.К., Меньшикова А.Е., Бурученко А.Е., Могилевская Н.В. Керамические материалы на основе диопсида // *Стекло и керамика*. 2010. Т. 83. № 11. С. 13–16. EDN NBKRMB.
17. Меньшикова В.К., Демина Л.Н. Модификация керамических составов сырьевыми материалами Сибирского региона // *Вестник Евразийской науки*. 2020. Т. 12. № 4. С. 1–9. URL: <https://esj.today/PDF/02SAVN420.pdf>
18. Верещагин В.И., Могилевская Н.В., Сафонова Т.В. Спекание и прочность стеновой керамики и фаянса из композиций глинистого и диопсидсодержащего сырья // *Вестник ТГАСУ*. 2019. Т. 21. № 6. С. 122–131. DOI: 10.31675/1607-1859-2019-21-6-122-133. EDN TFUCTT.
19. Nguyen M., Sokolar R. The influence of the raw materials mixture on the properties of forsterite ceramics // *IOP Conf. Series: Materials Science and Engineering*. 2018. Vol. 385 (1). P. 012039. DOI: 10.1088/1757-899X/385/1/012039
20. Tzong-Horng Liou, Yuan Hao Liou. Utilization of rice husk ash in the preparation of graphene-oxide-based mesoporous nanocomposites with excellent adsorption performance // *Materials (Basel)*. 2021. No. 14 (5). P. 1214. DOI: 10.3390/ma14051214

## REFERENCES

1. Lobacheva G.K., Zheltobryukhov V.F. *The State of Issue Regarding By-products and the Modern Methods of Their Processing : teaching aid*. Volgograd, Editing House VolGU, 2005; 176. (rus).
2. Suhot M.A., Hassan M., Aziz S.A., Daud M.Yu.M. Recent progress of rice husk reinforced polymer composites. *Polymers (Basel)*. 2021; 13:2391. DOI: 10.3390/polym13152391
3. Morimoto K., Tsuda K., Mizuno D. Literature review on the utilization of rice husks: focus on application of materials for digital fabrication. *Materials*. 2023; 16(16):5597. DOI: 10.3390/ma16165597
4. Rohani A.B., Rosiyah Y., Seng N.G. Production of high purity amorphous silica from rice husk. *Procedia Chemistry*. 2016; 19:189-195. DOI: 10.1016/j.proche.2016.03.092
5. Gotlib E.M., Zenitova L.A. *Rice processing waste — promising raw material for the chemical industry : monograph. Part 2. Polymer composite materials filled with rice processing products*. Kazan, Otechestvo, 2023; 100. (rus).
6. Gotlib E.M., Sokolova A.G., Zenitova L.A., Galimov E.R., Valeeva A.R. Epoxy and polyvinylchloride materials with fillers derived from rice waste. *E3S Web of Conferences*. 2024; 533:01001. DOI: 10.1051/e3sconf/202453301001
7. Nicoara A.I., Alecu A.E., Balaceanu G.C., Puscasu E.M., Vasile B.S., Trusca R. Fabrication and characterization of porous diopside/akermanite ceramics with prospective tissue. *Engineering Applications Materials*. 2023; 16(16):5548. DOI: 10.3390/ma16165548
8. Hamisah I., Roslinda S., Muhammad A.H., Azman J. Synthesis and Characterization of Nano — Wollastonite from Rice Husk Ash and Limestone. *Materials Science Forum*. 2013; 756(5):43-47. DOI: 10.4028/www.scientific.net/MSF.756.43
9. Ramphueiphad S., Homchat K. The continuous carbonisation of rice husk for high yield charcoal production. *SSRN Electronic Journal*. 2022. DOI: 10.2139/ssrn.4052344
10. Kozubov M.P., Khokhlov E.V., Islamova G.G., Gotlib E.M., Gabdulkhayev K.R. Obtaining of Amorphous Silicon Dioxide in Industrial Conditions on the Base of Rice Husk. *Technologies of Waste Processing with Obtaining of New Products. Proceedings of V All-Russian Scientific and Practical conference*. Kirov, 2023; 86-89. EDN QOHQGI. (rus).
11. Tverdob I.D., Gotlib E.M., Ntsoumou R.Sh., Yamaleeva E.S. Diopside as a filler of epoxy polymers. *South-Siberian Scientific Bulletin*. 2023; 4:11-15. DOI: 10.25699/SSSB.2023.50.4.017. EDN JYNKJY. (rus).
12. Tverdob I.D., Gotlib E.M., Yamaleeva E.S., Kholin K.V., Sultanov T.P. The study of phase transitions in the process of solid phase synthesis of diopside on the base of rice husk ash. *Proceedings of the Voronezh State University of Engineering Technologies*. 2024; 86(2):55-58. DOI: 10.20914/2310-1202-2024-2-277-283 (rus).
13. Mishagin K.A., Yamaleeva E.S., Gotlib E.M., Sokolova A.G., Pirogova N.N. The impact of calcium silicate obtained from zeolite-siliceous rock on properties of ceramic materials. *Construction Economics*. 2024; 10:433-435.
14. Mukri B.D., Krushnamurty K., Chowdhury A., Suryakala D., Subrahmanyam C. Alkali-treated carbonized rice husk for the removal of aqueous Cr(IV). *BioResources*. 2016; 11(4):9175-9189.
15. Soltani N., Bahrami A., Pech-Canul M.I., Gonzalez L.A. Review on the physicochemical treatments of rice husk for production of advanced materials. *Chemical Engineering Journal*. 2015; 264:899-935. DOI: 10.1016/j.cej.2014.11.056

16. Vereshchagin G.K., Men'shikova A.E., Buruchenko A.E., Mogilevskaya N.V. Ceramic materials on the diopside base. *Glass and Ceramics*. 2010; 83(11):13-16. EDN NBKRMB. (rus).
17. Men'shikova V. K., Dyomina L.N. Modification of ceramic compositions with raw materials of the Siberian region. *The Eurasian Scientific Journal*. 2020; 12(4):1-9. URL: <https://esj.today/PDF/02SAVN420.pdf> (rus).
18. Vereshchagin V.I., Mogilevskaya N.V., Safonova T.V. Clunkering and strength of wall ceramics and semi-porcelain of compositions from clayey and diopside-containing raw materials. *Journal of Construction and Architecture*. 2019; 21(6):122-131. DOI: 10.31675/1607-1859-2019-21-6-122-133. EDN TFUCTT. (rus).
19. Nguyen M., Sokolar R. The influence of the raw materials mixture on the properties of forsterite ceramics. *IOP Conference Series Materials Science and Engineering*. 2018; 385(1):012039. DOI: 10.1088/1757-899X/385/1/012039
20. Tzong-Horng Liou, Yuan Hao Liou. Utilization of rice husk ash in the preparation of graphene-oxide-based mesoporous nanocomposites with excellent adsorption performance. *Materials (Basel)*. 2021; 14(5):1214. DOI: 10.3390/ma14051214

Поступила 08.01.2025, после доработки 02.02.2025;

принята к публикации 04.02.2025

Received January 8, 2025; Received in revised form February 2, 2025;

Accepted February 4, 2025

### Информация об авторах

**СОКОЛОВА Алла Германовна**, к.т.н., доцент кафедры строительного материаловедения, Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет, Россия, 129337, г. Москва, Ярославское шоссе, 26; ORCID: 0000-0001-8425-1883; ResearcherID: F-3314-2017; Scopus AuthorID: 57202822282; e-mail: as.falconi@yandex.ru

**ГАБДУЛХАЕВ Камиль Радикович**, аспирант кафедры технологии синтетического каучука, Казанский национальный исследовательский технологический университет, 420015, Россия, г. Казань, ул. Карла Маркса, 68; Scopus AuthorID: 59485045700; e-mail: 19gkraidido99@mail.ru

**ГОТЛИБ Елена Михайловна**, д.т.н., профессор кафедры технологии синтетического каучука, Казанский национальный исследовательский технологический университет, 420015, Россия, г. Казань, ул. Карла Маркса, 68; ORCID: 0000-0003-1666-8702; Scopus AuthorID: 6603371638; e-mail: egotlib@yandex.ru

#### Вклад авторов:

**Соколова А.Г.** — идея; обработка материала; написание статьи.

**Габдулхаев К.Р.** — сбор и обработка материала.

**Готлиб Е.М.** — концепция; научное редактирование текста; общее руководство.

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

### Information about authors

**Alla G. SOKOLOVA**, Cand. Sci. (Eng.), Associate Professor of the Department of Materials Science, Moscow State University of Civil Engineering (National Research University), Yaroslavl'shoss, 26, Moscow, 129337, Russian Federation; ORCID: 0000-0001-8425-1883; ResearcherID F-3314-2017; Scopus AuthorID: 57202822282; e-mail: as.falconi@yandex.ru

**Kamil R. GABDULKHAYEV**, PhD student of the Department of the Syntetic Rubber Technology, Kazan National Research Technological University, Karl Marx st., 68, Kazan, 420015, Russian Federation; Scopus AuthorID: 59485045700; e-mail: 19gkraidido99@mail.ru

**Elena M. GOTLIB**, Dr. Sci. (Eng.), Full professor of the Synthetic Rubber Technology Department, Kazan National Research Technological University, Karl Marx st., 68, Kazan, 420015, Russian Federation; ORCID: 0000-0003-1666-8702; Scopus AuthorID: 6603371638; e-mail: egotlib@yandex.ru

#### Contribution of the authors:

**Sokolova A.G.** — idea; processing of the material; writing the article.

**Gabdulkhayev K.R.** — collection of the data; processing of the data.

**Gotlib E.M.** — concept; scientific editing of the text; general guidance.

The authors declare that there is no conflict of interest.



## Особенности применения метода конечных элементов при выполнении теплотехнических расчетов незащищенных стальных строительных конструкций в рамках разработки проектной документации по их огнезащите

Татьяна Юрьевна Еремина<sup>1</sup>, Денис Александрович Минайлов<sup>2</sup>✉

<sup>1</sup> Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет, 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.** Применение современных компьютерных технологий позволило достичь высоких практических и экономических результатов в строительстве современных зданий и сооружений. Это связано с тем, что современные программные комплексы позволяют с достаточной точностью прогнозировать поведение строительных конструкций в условиях воздействия различных факторов, в том числе и в условиях высокотемпературного воздействия. При этом следует отметить, что в подавляющем большинстве современных программных комплексов наибольшее распространение получили сеточные методы решения дифференциального уравнения теплопроводности Фурье, а именно метод конечных элементов. Результат расчета, полученный при помощи метода конечных элементов, зависит от различных факторов, которые могут быть не всегда очевидны при решении конкретной задачи, но для получения необходимой точности решения их необходимо учитывать в процессе моделирования.

**Цели и задачи.** Целью работы является оценка сходимости численного решения дифференциального уравнения теплопроводности Фурье методом конечных элементов при выполнении теплотехнического расчета прогрева незащищенных стальных строительных конструкций в рамках разработки проектной документации по их огнезащите, а также валидация полученных результатов математического моделирования с известными результатами расчетно-аналитических решений.

**Методы.** В качестве объекта моделирования принята стальная колонна двутаврового сечения профиля № 20 по ГОСТ 8239. Моделирование прогрева исследуемой конструкции методом конечных элементов производилось без использования огнезащиты при упрощении размерности задачи с трехмерной до двухмерной. Верификация полученных результатов моделирования производилась по критерию сходимости численного решения задачи на моделируемом интервале времени (60 мин) при последовательности сеток (трех сеток с числом степеней свободы (DOFs): 200, 2084, 7102) и шагов по времени (десяти шагов по времени: 0,05, 0,1, 0,5, 1, 2, 3, 5, 10, 15, 30 с). Валидация полученных результатов производилась сопоставлением с результатами теплотехнических расчетов металлоконструкций, изложенными в книге А.И. Яковлева «Расчет огнестойкости строительных конструкций».

**Результаты и обсуждение.** В результате проведения серии теплотехнических расчетов прогрева исследуемой стальной строительной конструкции с различными шагами сеток и шагами по времени установлено, что шаг моделирования по времени оказал большее влияние на сходимость полученных результатов, чем шаг сетки. При этом изменение сходимости полученных результатов в исследуемом интервале времени для всех вариантов моделирования происходило неравномерно, а именно: в начале моделируемого интервала времени разница получаемых температур в сечении конструкции сначала увеличивалась, а затем уменьшалась. Сравнение полученных результатов с результатами теплотехнических расчетов, изложенными в книге А.И. Яковлева, показало, что полученная средняя температура в сечении конструкции оказалась ниже температуры, указанной в книге А.И. Яковлева, при этом разница между полученными временами достижения критической температуры (450–750 °С) увеличивается как при увеличении значения критической температуры, так и при увеличении приведенной толщины металла.

**Заключение.** Оценка сходимости полученных результатов моделирования прогрева стальной строительной конструкции методом конечных элементов и их валидация с известными расчетно-аналитическими решениями показали, что применение метода конечных элементов при выполнении теплотехнических расчетов в рамках разработки проектной документации по огнезащите стальных строительных конструкций имеет свои особенности, которые необходимо учитывать для получения требуемой точности решения.

**Ключевые слова:** огнестойкость; стальная строительная конструкция; численное моделирование; сходимость численного решения; верификация численных решений; проект огнезащиты

Для цитирования: Еремина Т.Ю., Минайлов Д.А. Особенности применения метода конечных элементов при выполнении теплотехнических расчетов незащищенных стальных строительных конструкций в рамках разработки проектной документации по их огнезащите // Пожаровзрывобезопасность/Fire and Explosion Safety. 2025. Т. 34. № 1. С. 40–58. DOI: 10.22227/0869-7493.2025.34.01.40-58

✉ Минайлов Денис Александрович, e-mail: minailov-denis@mail.ru

# Application of the finite element method for thermal calculations of unprotected steel building structures within the framework of development of design documentation for their fire protection

Tayana Yu. Eremina<sup>1</sup>, Denis A. Minailov<sup>2</sup> ✉

<sup>1</sup> Moscow State University of Civil Engineering (National Research University), 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.** The application of modern computer technologies made it possible to achieve high practical and economic results in the construction of modern buildings and structures. This is due to the fact that modern software complexes allow to predict with sufficient accuracy the behaviour of building structures under the influence of various factors, including high-temperature influence. It should be noted that in the overwhelming majority of modern software systems, the most widespread are grid methods for solving the Fourier differential equation of heat conduction, namely the finite element method. The calculation result obtained using the finite element method depends on various factors that may not always be obvious when solving a particular problem, but in order to obtain the necessary accuracy of the solution, they must be taken into account in the modelling process.

**Aims and Objectives.** The aim of the work is to assess the convergence of the numerical solution of the Fourier differential heat conduction equation by the finite element method when performing the thermal calculation of heating of unprotected steel building structures within the framework of the development of design documentation for their fire protection, as well as validation of the obtained results of mathematical modelling with the known results of calculation and analytical solutions.

**Methods.** A steel column of I-beam section of profile No. 20 according to GOST 8239 was taken as a modelling object. Modelling of heating of the investigated structure by the finite element method was carried out without the use of fire protection when simplifying the dimensionality of the problem from three-dimensional to two-dimensional. Verification of the obtained modelling results was performed by the criterion of convergence of the numerical solution of the problem at the modelled time interval (60 min) at the sequence of meshes (three meshes with the number of degrees of freedom (DOFs): 200, 2,084, 7,102) and time steps (ten time steps: 0.05, 0.1, 0.5, 1, 2, 3, 5, 10, 15, 30 s). Validation of the obtained results was performed by comparison with the results of thermal calculations of steel structures, set out in the book "Calculation of fire resistance of building structures" by A.I. Yakovlev.

**Results and Discussion.** As a result of carrying out a series of thermal calculations of heating of the studied steel building structure with different grid steps and time steps, it was found that the modelling time step had a greater influence on the convergence of the obtained results than the grid step. At the same time, the change in the convergence of the obtained results in the studied time interval for all modelling variants occurred unevenly, namely: at the beginning of the modelled time interval, the difference of the obtained temperatures in the cross-section of the structure first increased and then decreased. Comparison of the obtained results with the results of thermotechnical calculations stated in the book by A.I. Yakovlev showed that the obtained average temperature in the cross-section of the structure was lower than the temperature stated in the book by A.I. Yakovlev, while the difference between the obtained times of reaching the critical temperature (450–750 °C) increases both with increasing the value of the critical temperature and with increasing the reduced thickness of the metal.

**Conclusion.** The assessment of convergence of the obtained results of modelling the heating of steel building structure by the finite element method and their validation with the known design and analytical solutions have shown that the application of the finite element method in the performance of thermal calculations within the development of design documentation for fire protection of steel building structures has its own features, which must be taken into account to obtain the required accuracy of the solution.

**Keywords:** fire resistance; steel building structure; numerical modelling; convergence of numerical solution; verification of numerical solutions; fire protection project

**For citation:** Eremina T.Yu., Minailov D.A. Application of the finite element method for thermal calculations of unprotected steel building structures within the framework of development of design documentation for their fire protection. *Pozharovzryvobezopasnost'/Fire and Explosion Safety*. 2025; 34(1):40-58. DOI: 10.22227/0869-7493.2025.34.01.40-58 (rus).

✉ Denis Alexandrovich Minailov, e-mail: minailov-denis@mail.ru

## Введение

В настоящее время развитие строительной отрасли неразрывно связано с применением математического моделирования, так как такой подход позволяет не только повысить качество проектной документации, но и сократить сроки ее подготовки [1, 2]. При этом следует отметить, что существующая в России нормативно-правовая база по проектированию стальных строительных конструкций имеет ряд недостатков, связанных с ее несовершенством, а применяемое программное обеспечение требует актуализации [3, 4].

Сегодня одним из перспективных направлений для достижения цели инновационного развития функциональных блоков строительной отрасли является внедрение математического моделирования, включая оптимизацию процессов проектирования, строительства, эксплуатации и утилизации объекта строительства.

Сегодня для решения различных задач в строительстве существует более 100 программных комплексов (рис. 1) [1], которые зачастую на этапах проектирования применяются совместно и дополняют друг друга.

Зачастую применение любого программного комплекса требует в соответствии с решаемой задачей определенной настройки его модулей, позволяющей с достаточной точностью описать рассматриваемый процесс. Для этого нужно не только понимать протекание моделируемого процесса, но и как происходит сам процесс моделирования (рис. 2).

Одним из важных вопросов, рассматриваемых при проектировании стального каркаса зданий и сооружений, является вопрос обеспечения его огнестойкости, решаемый в рамках разработки проектной документации по огнезащите стальных строительных конструкций различными средствами огнезащиты [3–18]. Сам процесс разработки проектной документации по огнезащите стальных строительных конструкций можно условно разделить на следующие этапы (рис. 3), результатом которых становится выбор средства огнезащиты и его толщины.

При определении пределов огнестойкости стальных строительных конструкций в рамках разработки проектной документации по их огнезащите, как правило, применяется расчетно-аналитический метод [3, 4, 19], совместно с которым, или вместо него, также могут использоваться методы матема-



Рис. 1. Современные программные комплексы  
Fig. 1. Modern software systems

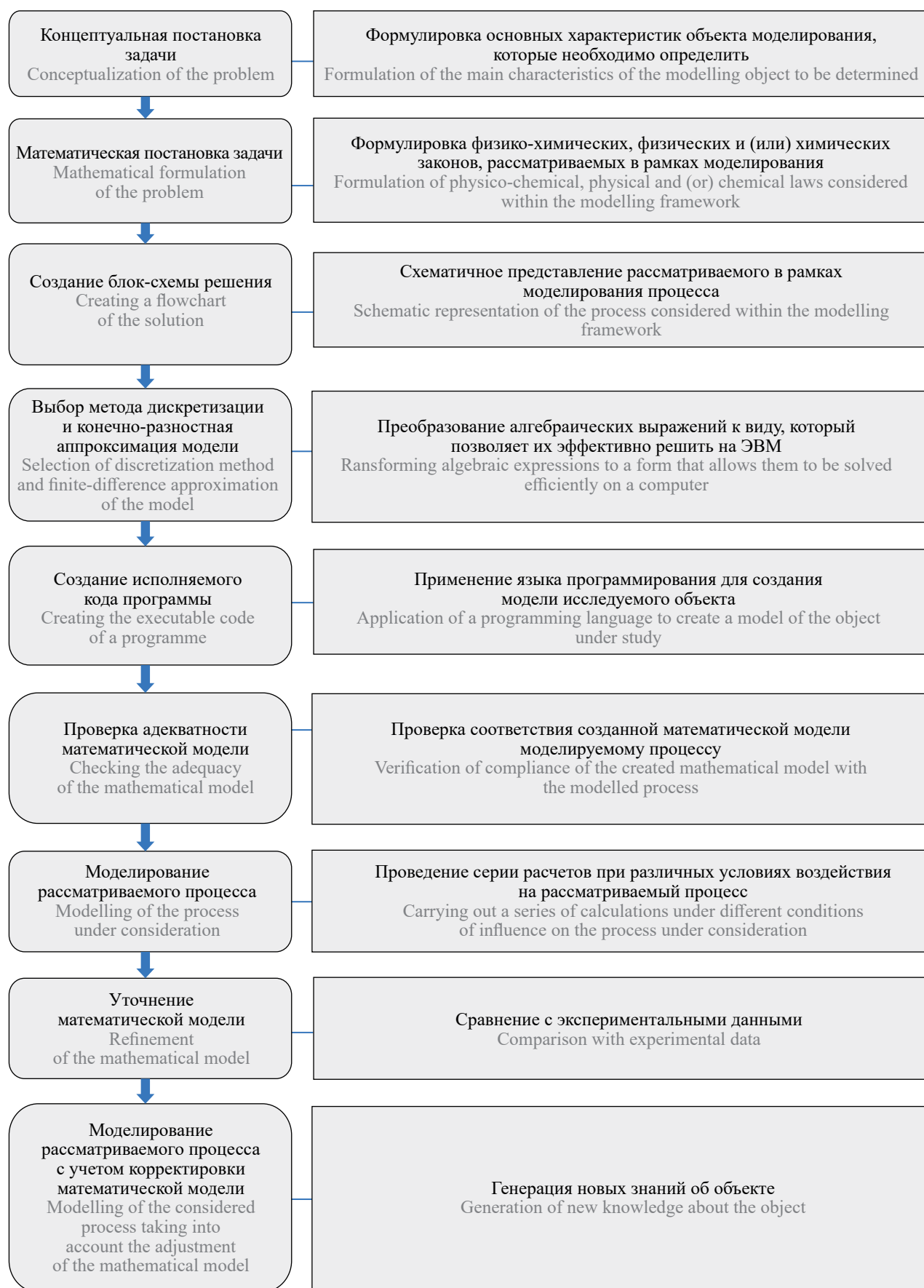


Рис. 2. Последовательность проведения компьютерного моделирования [2]

Fig. 2. Sequence of computer modeling [2]





**Рис. 3.** Алгоритм проектирования огнезащиты строительных конструкций  
**Fig. 3.** Algorithm for designing fire protection of building structures

тического моделирования<sup>1, 2, 3</sup> [17, 18, 20–43]. Среди применяемых методов математического моделирования наиболее широкое распространение получили сеточные методы, среди которых можно выделить метод конечных элементов, реализованный в большинстве современных программных комплексах.

В случае применения метода конечных элементов при решении теплотехнической задачи прогрева стальной строительной конструкции необходимо про-

вести верификацию полученных результатов моделирования, а также их интерпретацию [23, 25, 31]. При этом следует отметить, что для выполнения численных расчетов должно применяться верифицированное и валидированное программное обеспечение, а также привлекаться квалифицированные специалисты, обладающие специальными знаниями в области огнестойкости стальных строительных конструкций и в области вычислительной математики.

### Цель

Оценить сходимость численного решения дифференциального уравнения теплопроводности Фурье методом конечных элементов при выполнении теплотехнического расчета прогрева незащищенных стальных строительных конструкций в рамках разработки проектной документации по их огнезащите, а также валидацию полученных результатов математического моделирования с известными результатами расчетно-аналитических решений.

<sup>1</sup> Johnston R.P.D., Lim J.B.P., Sonebi M., Wrzesien A.M., Armstrong C. The Structural Behaviour in Fire of a Cold-Formed Steel Portal Frame Having Semi-Rigid Joints. URL: <https://www.semanticscholar.org/paper/The-structural-behaviour-in-fire-of-a-cold-formed-Johnston-Lim/39855c2970a9929f79cf35-afd48e0e5959808510> (accessed: 15 October 2021).

<sup>2</sup> Circolare DCPREV 9962 del 24/07/2020 — Implementazione di Soluzioni Alternative di Resistenza al Fuoco; Chiarimenti e Indirizzi Applicativi; Ministero dell'interno — Dipartimento dei Vigili del Fuoco, del Soccorso Pubblico e della Difesa Civile. Direzione Centrale per la Prevenzione e la Sicurezza Tecnica. Area Protezione Passiva : Rome, Italy, 2020.

<sup>3</sup> An Overview of Intumescent Coatings. American Coating Association. URL: <https://www.paint.org/coatingstech-magazine/articles/overview-intumescent-coatings/> (accessed: 18 April 2022).

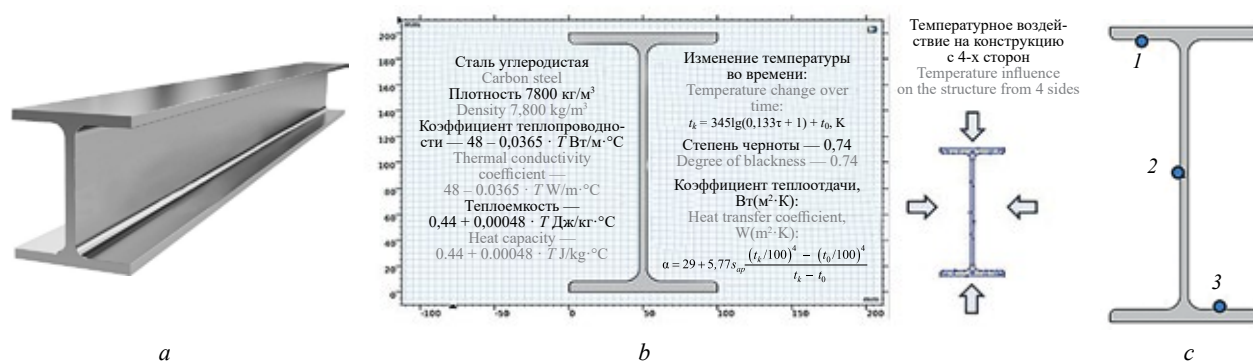


Рис. 4. Стальная колонна двутаврового сечения профиля № 20 по ГОСТ 8239–89<sup>4</sup>: *a* — внешний вид; *b* — 2D-модель; *c* — места контроля температур

Fig. 4. Steel column of I-beam section of profile No. 20 according to GOST 8239–89<sup>4</sup>: *a* — external view; *b* — 2D-model; *c* — temperature control points

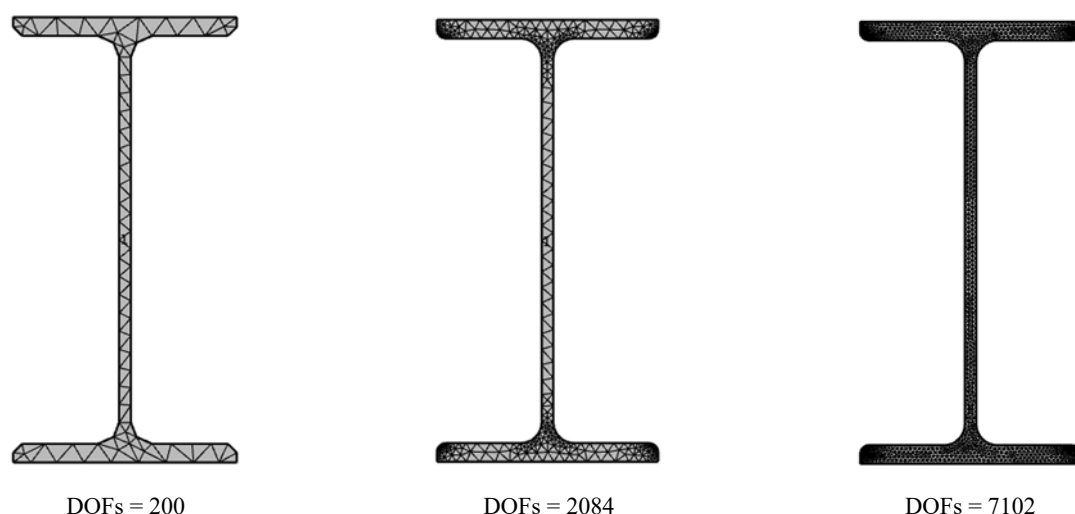


Рис. 5. Применяемые при расчетах сетки с числом степеней свободы DOFs

Fig. 5. Meshes used in calculations with the number of degrees of freedom DOFs

Для достижения поставленной цели решались следующие задачи:

- провести серию численных расчетов методом конечных элементов прогрева стальной колонны двутаврового сечения профиля № 20 по ГОСТ 8239<sup>4</sup> в условиях воздействия стандартного температурного режима при различном шаге сетки и шаге по времени;
- оценить сходимость полученных результатов моделирования;
- провести валидацию полученных результатов моделирования с известными расчетно-аналитическими решениями.

### Методы

В качестве объекта моделирования принята стальная колонна двутаврового сечения профиля № 20 по ГОСТ 8239–89<sup>4</sup> (рис. 4). Моделирование

прогрева исследуемой конструкции методом конечных элементов производилось без использования огнезащиты при упрощении размерности задачи с трехмерной до двухмерной, так как для стержневых конструкций можно принять изменение температуры только по поперечному сечению в двух направлениях.

Верификация полученных результатов моделирования производилась по критерию сходимости численного решения задачи на моделируемом интервале времени (60 мин) при последовательности сеток (трех сеток с числом степеней свободы (DOFs): 200, 2084, 7102) (рис. 5) и шагов по времени (десяти шагов по времени: 0,05, 0,1, 0,5, 1, 2, 3, 5, 10, 15, 30 с).

Начальные и граничные условия моделирования приведены в табл. 1.

Валидация полученных результатов моделирования при различных условиях обогрева стальной строительной конструкции (табл. 2) производилась сопоставлением полученных температур в местах

<sup>4</sup> ГОСТ 8239–89. Двутавры стальные горячекатаные. Сортамент.

**Таблица 1.** Начальные и граничные условия моделирования  
**Table 1.** Initial and boundary conditions for modelling

Начальные условия моделирования Initial modelling conditions
<p>Температура по сечению конструкции одинакова и равна температуре окружающей среды:  <math>T_n = 20\text{ }^{\circ}\text{C}</math> (293,15 K)                      The temperature across the cross-section of the structure is the same and equal to the ambient temperature:  <math>T_{out} = 20\text{ }^{\circ}\text{C}</math> (293.15 K)</p>
Граничные условия моделирования Modelling boundary conditions
<p>Изменение температуры среды <math>t_b</math>, K, во времени <math>\tau</math>, с, задается следующим уравнением:                      The change of the medium temperature <math>t_{in}</math>, K, in time <math>\tau</math>, s, is given by the following equation:</p> $T_b = T_n + 345 \cdot \lg\left(\frac{8}{60}\tau + 1\right).$ $T_{in} = T_{out} + 345 \cdot \lg\left(\frac{8}{60}\tau + 1\right).$ <p>Коэффициент теплоотдачи <math>\alpha</math>, Вт/м<sup>2</sup>·К, от среды к поверхности конструкции в связи с отсутствием экспериментальных данных вычисляется по формуле:                      The heat transfer coefficient <math>\alpha</math>, W/m<sup>2</sup>·K, from the medium to the surface of the structure due to the lack of experimental data is calculated by the formula:</p> $\alpha = 29 + 5,77 \cdot s_{np} \frac{(t_b/100)^4 - (t_0/100)^4}{t_b - t_0}$ $\alpha = 29 + 5,77 \cdot s_{sp} \frac{(t_{in}/100)^4 - (t_0/100)^4}{t_{in} - t_0},$ <p>где <math>s_{np}</math> — приведенная степень черноты; <math>t_0</math> — температура стальной строительной конструкции, K.                      where <math>s_{sp}</math> is the reduced degree of blackness; <math>t_0</math> is the temperature of steel building structure, K.</p> $s_{np} = \frac{1}{\left(\frac{1}{s}\right) + \left(\frac{1}{s_0}\right) - 1}$ $s_{sp} = \frac{1}{\left(\frac{1}{s}\right) + \left(\frac{1}{s_0}\right) - 1},$ <p>где <math>s = 0,85</math>; <math>s_0</math> — степень черноты поверхности стальной строительной конструкции                      where <math>s = 0.85</math>; <math>s_0</math> — degree of blackness of the surface of steel building structure</p>

контроля (рис. 4), а также максимальной, минимальной и средней температур в сечении конструкции с результатами теплотехнических расчетов металлоконструкций, изложенными в книге [19].

### Результаты и их обсуждение

Результаты численного моделирования прогрева на моделируемом интервале времени (60 мин) при последовательности сеток (трех сеток с числом степеней свободы (DOFs): 200, 2084, 7102) и шагов по времени (десяти шагов по времени: 0,05, 0,1, 0,5, 1, 2, 3, 5, 10, 15, 30 с) представлены на рис. 6.

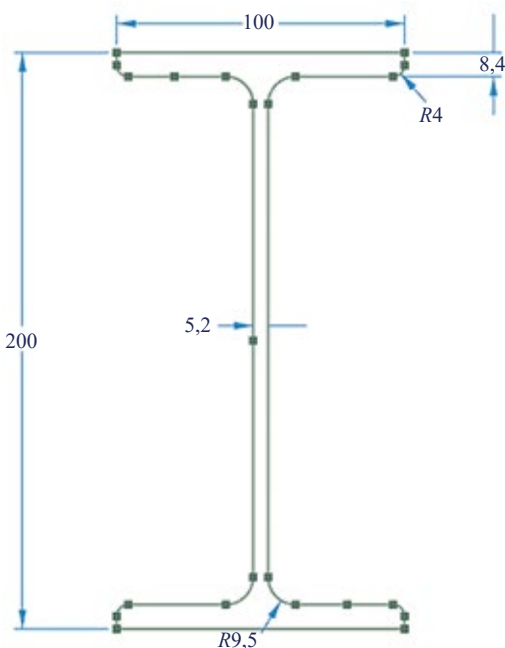
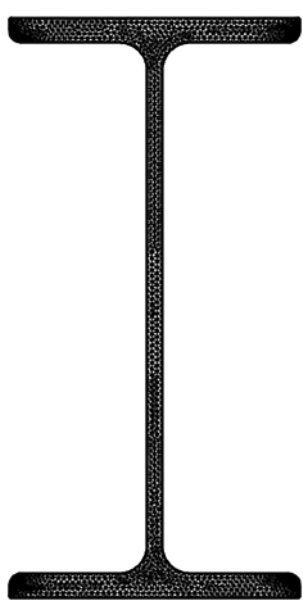






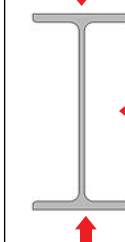
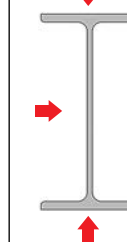
В качестве параметра контроля сходимости решения задачи прогрева стального двутавра было выбрано значение разницы между средней темпера-

турой сечения, полученной при минимальном принятом шаге сетки и временном шаге решателя, и температурами, полученными при последующих вариантах шагов сеток и временных шагов решателя. За критерий сходимости принято значение получаемой разности не более 0,1 K.

Сравнительный анализ полученных результатов моделирования показал, что выбранному критерию сходимости удовлетворяет шаг времени решателя не более 1 с и сетка с числом степеней свободы не менее DOFs = 2084 (рис. 7, 8).

Результаты сравнения полученных температур в сечении рассматриваемой конструкции при различных вариантах обогрева с результатами, полученными расчетно-аналитическими методами [19], представлены на рис. 9–16.

Таблица 2. Варианты обогрева стальной строительной конструкции  
Table 2. Heating options for a steel building structure

Стальная колонна двутаврового сечения профиля № 20 по ГОСТ 8239–89 <sup>4</sup> Steel column of I-beam section of profile No. 20 according to GOST 8239–89 <sup>4</sup>							
							
Геометрические размеры сечения конструкции Geometric dimensions of the cross-section of the structure				Число степеней свободы DOFs = 7102 Number of degrees of freedom DOFs = 7,102			
Вариант численного моделирования / Numerical modelling option							
№ 1	№ 2	№ 3	№ 4	№ 5	№ 6	№ 7	№ 8
Временной шаг моделирования, с / Modelling time step, s							
1	1	1	1	1	1	1	1
Количество сторон обогрева / Number of heating sides							
							
1	1	2	2	2	3	3	4
Обогреваемый периметр, мм / Heated perimeter, mm							
100,00	283,21	383,21	200,00	566,42	666,42	483,21	766,42
Приведенная толщина металла, мм / Presented thickness of metal, mm							
26,96	9,52	7,04	13,48	4,76	4,05	5,58	3,52

Из графиков на рис. 9–16 видно, что наиболее близкой к значениям температуры, полученной расчетно-аналитическим методом, оказалась средняя температура по сечению конструкции. При этом с увеличением приведенной толщины металла

наблюдается увеличение разницы между сравниваемыми температурами, а также наблюдается увеличение разницы во времени достижения критической температуры конструкции (450–750 °С) (рис. 17).



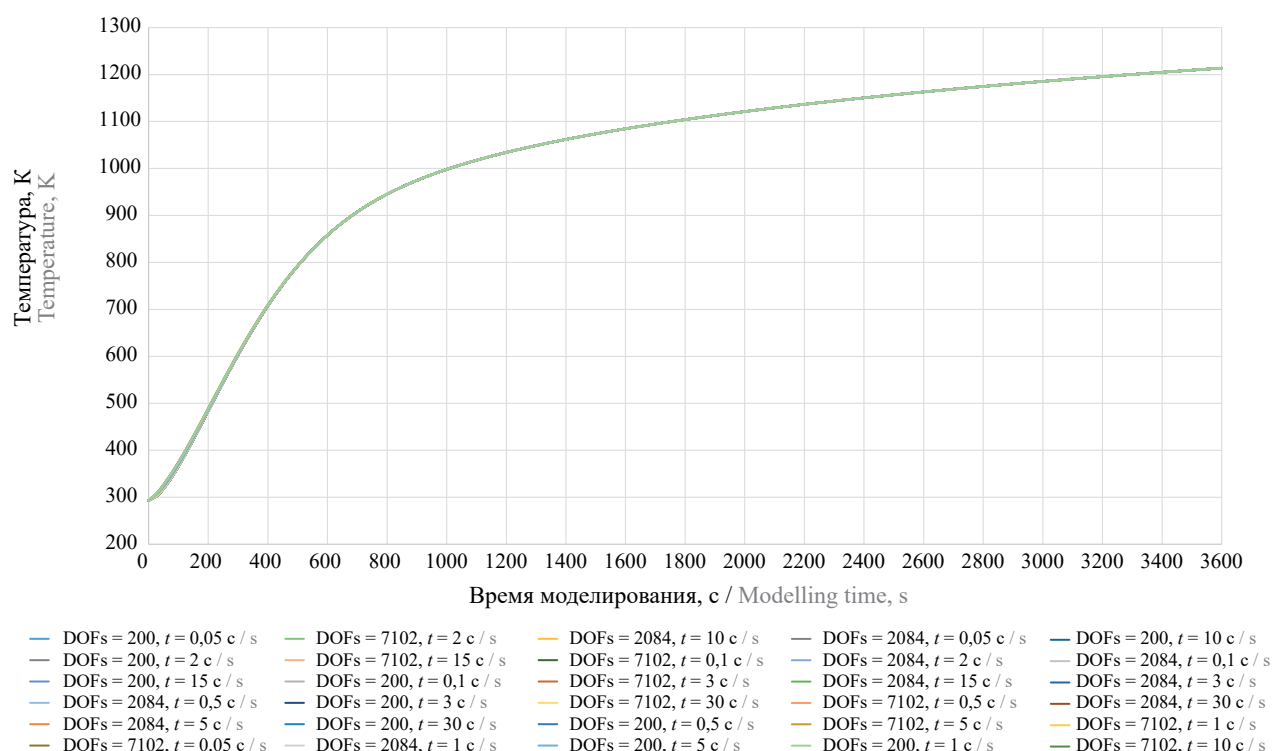


Рис. 6. Средняя температура в сечении двутавра в зависимости от количества степеней свободы (DOFs) и шага решателя по времени

Fig. 6. Average temperature in the I-beam cross section as a function of the number of degrees of freedom (DOFs) and the solver's time step

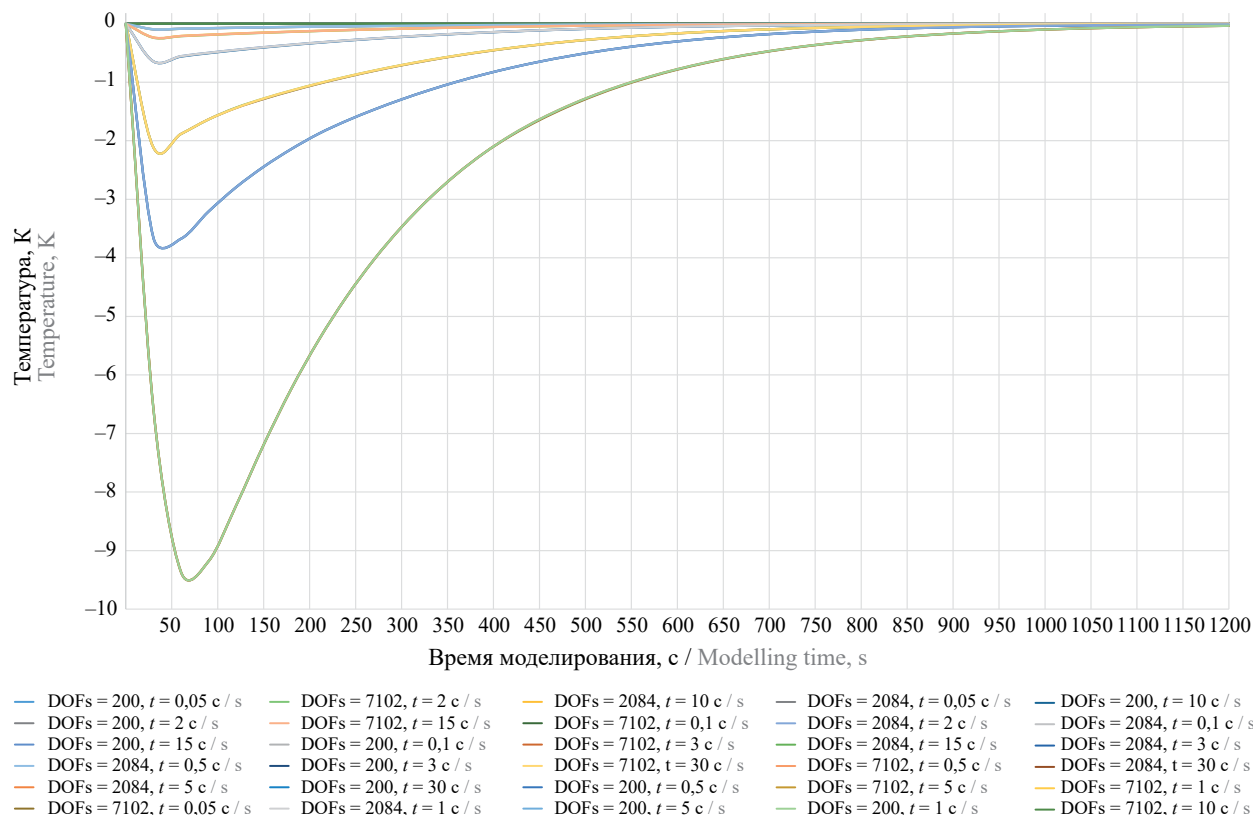


Рис. 7. Разница средних температур в сечении двутавра, полученных при различных шагах сетки и временном шаге решателя

Fig. 7. Difference of average temperatures in the cross-section of the I-beam obtained with different grid steps and time step of the solver

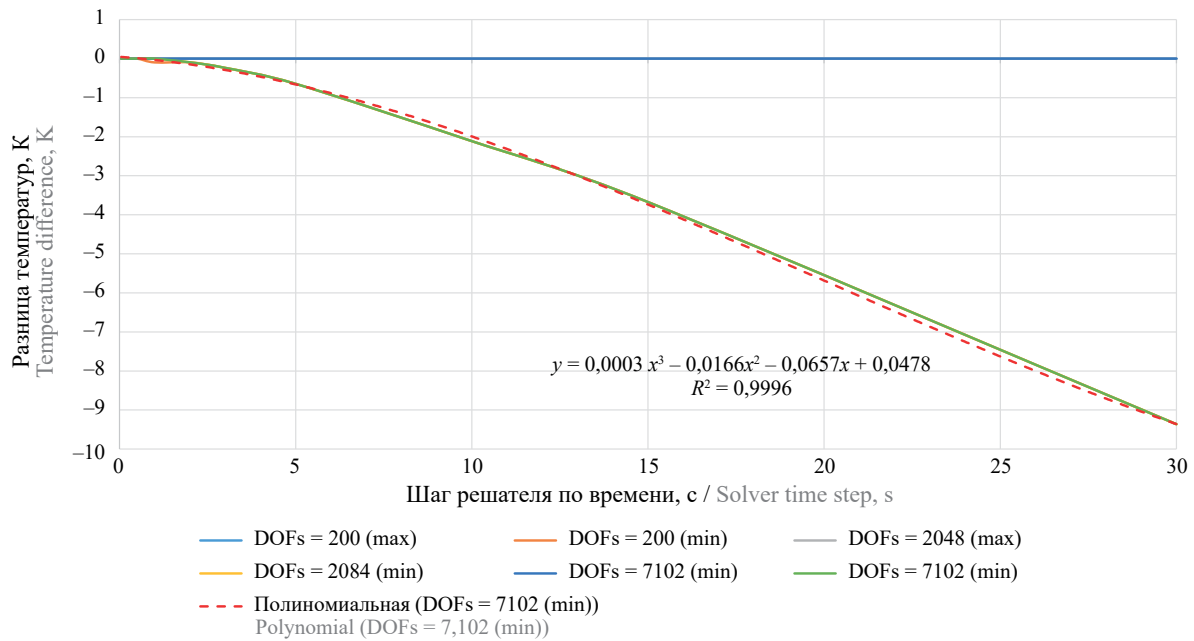
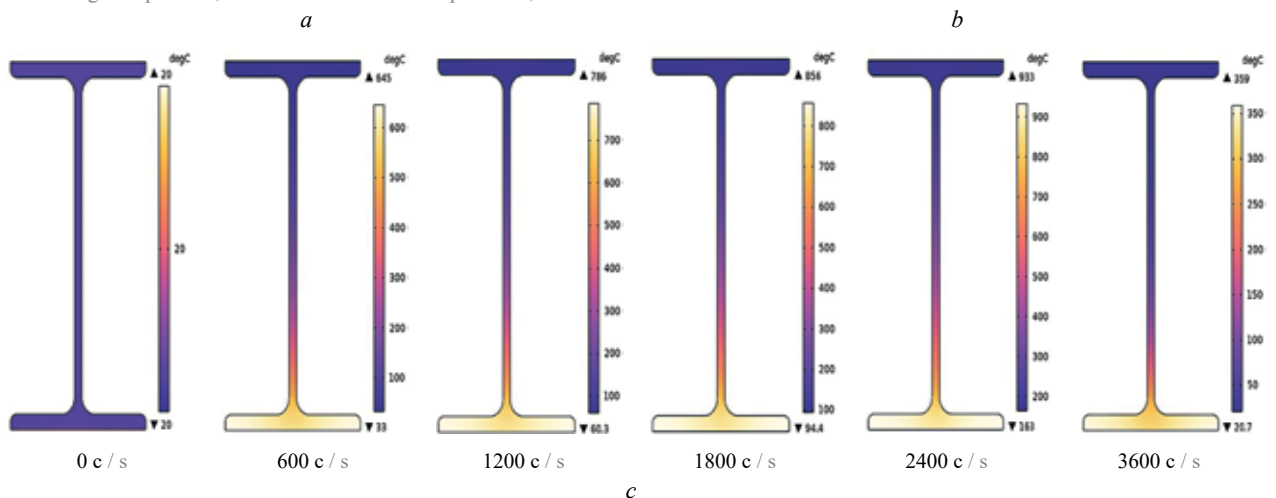
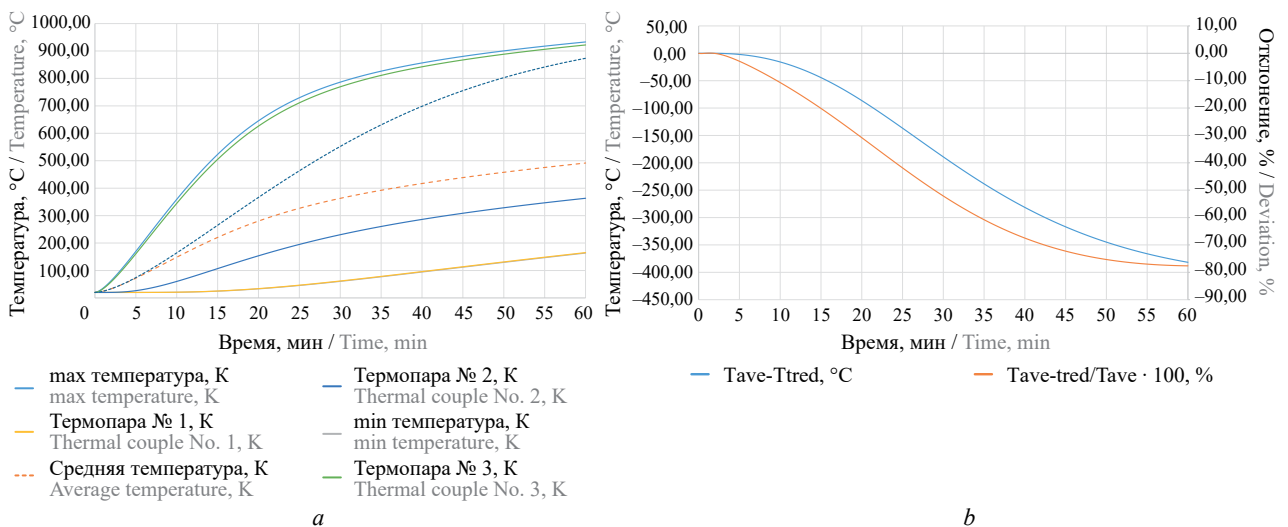


Рис. 8. Полученные максимальные и минимальные значения разностей температур

Fig. 8. Obtained maximum and minimum values of temperature differences

Рис. 9. Графики прогрева конструкции по 1-му варианту численного моделирования: а — графики прогрева конструкции; б — разность температур; в — температура в сечении конструкции ( $t_{red} = 26,96$  мм)Fig. 9. Graphs of structure heating according to the 1st variant of numerical modelling: а — graphs of structure heating; б — temperature difference; в — temperature in the structure section ( $t_{red} = 26,96$  mm)

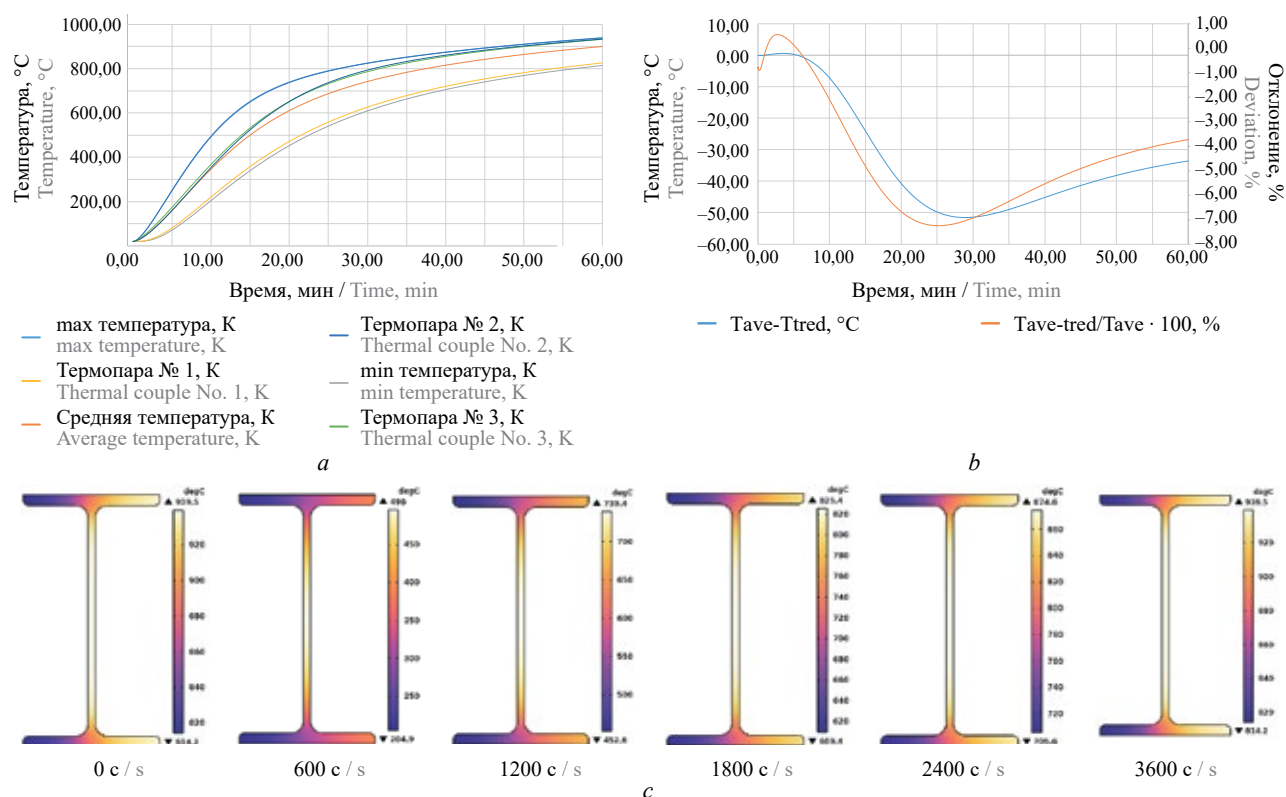


Рис. 10. Графики прогрева конструкции по 2-му варианту численного моделирования: *a* — графики прогрева конструкции; *b* — разница температур; *c* — температура в сечении конструкции ( $t_{red} = 9,52$  мм)

Fig. 10. Graphs of structure heating according to the 2nd variant of numerical modelling: *a* — graphs of structure heating; *b* — temperature difference; *c* — temperature in the cross-section of the structure ( $t_{red} = 9.52$  mm)

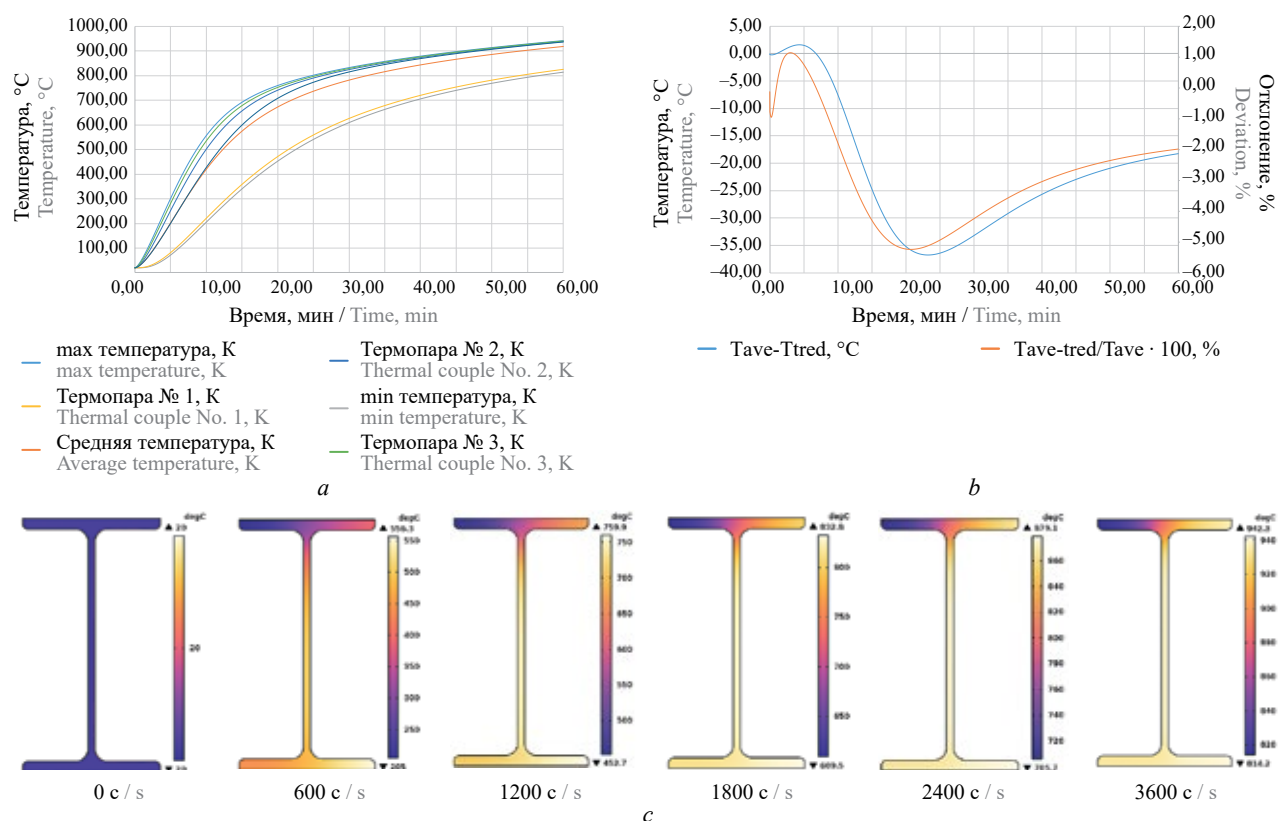


Рис. 11. Графики прогрева конструкции по 3-му варианту численного моделирования: *a* — графики прогрева конструкции; *b* — разница температур; *c* — температура в сечении конструкции ( $t_{red} = 7,04$  мм)

Fig. 11. Graphs of structure heating according to the 3rd variant of numerical modelling: *a* — graphs of structure heating; *b* — temperature difference; *c* — temperature in the cross-section of the structure ( $t_{red} = 7.04$  mm)

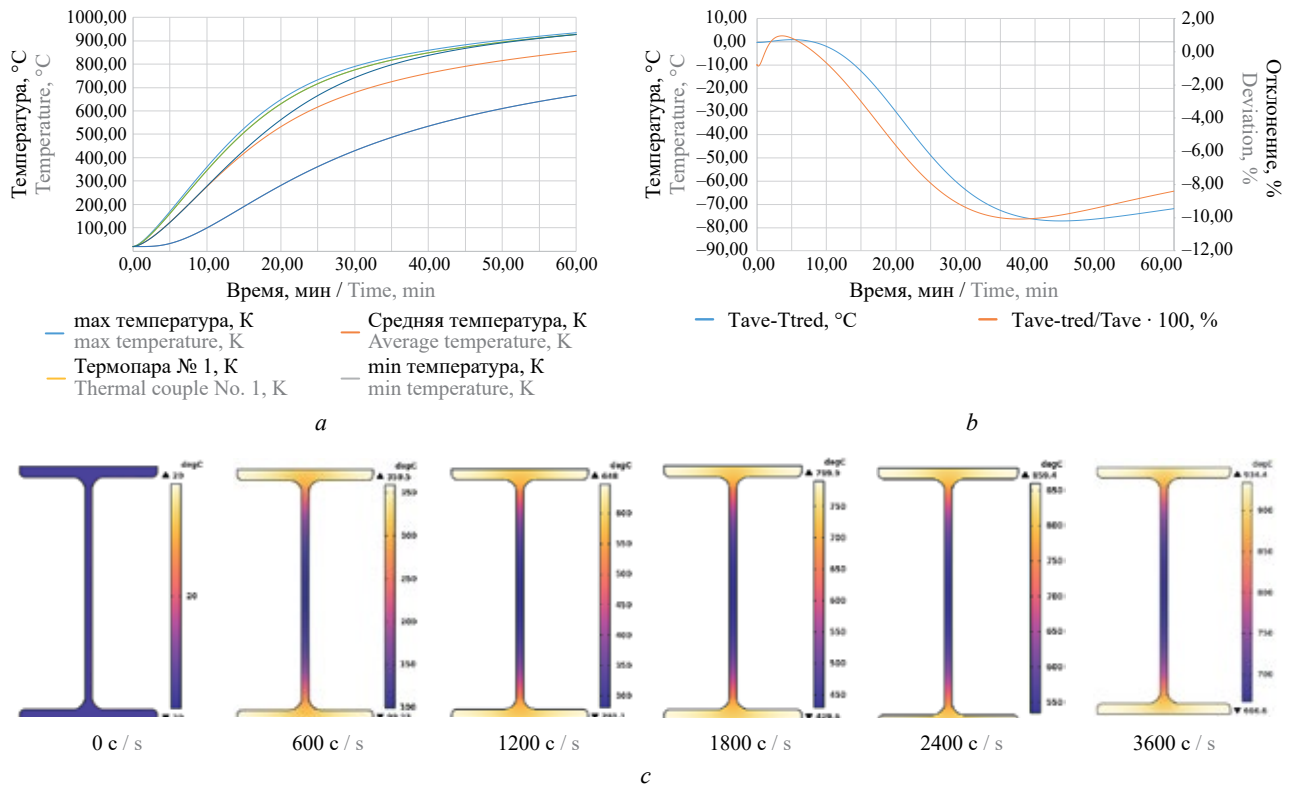


Рис. 12. Графики прогрева конструкции по 4-му варианту численного моделирования: *a* — графики прогрева конструкции; *b* — разница температур; *c* — температура в сечении конструкции ( $t_{red} = 13,48$  мм)

Fig. 12. Graphs of structure heating according to the 4th variant of numerical modelling: *a* — graphs of structure heating; *b* — temperature difference; *c* — temperature in the cross-section of the structure ( $t_{red} = 13.48$  mm)

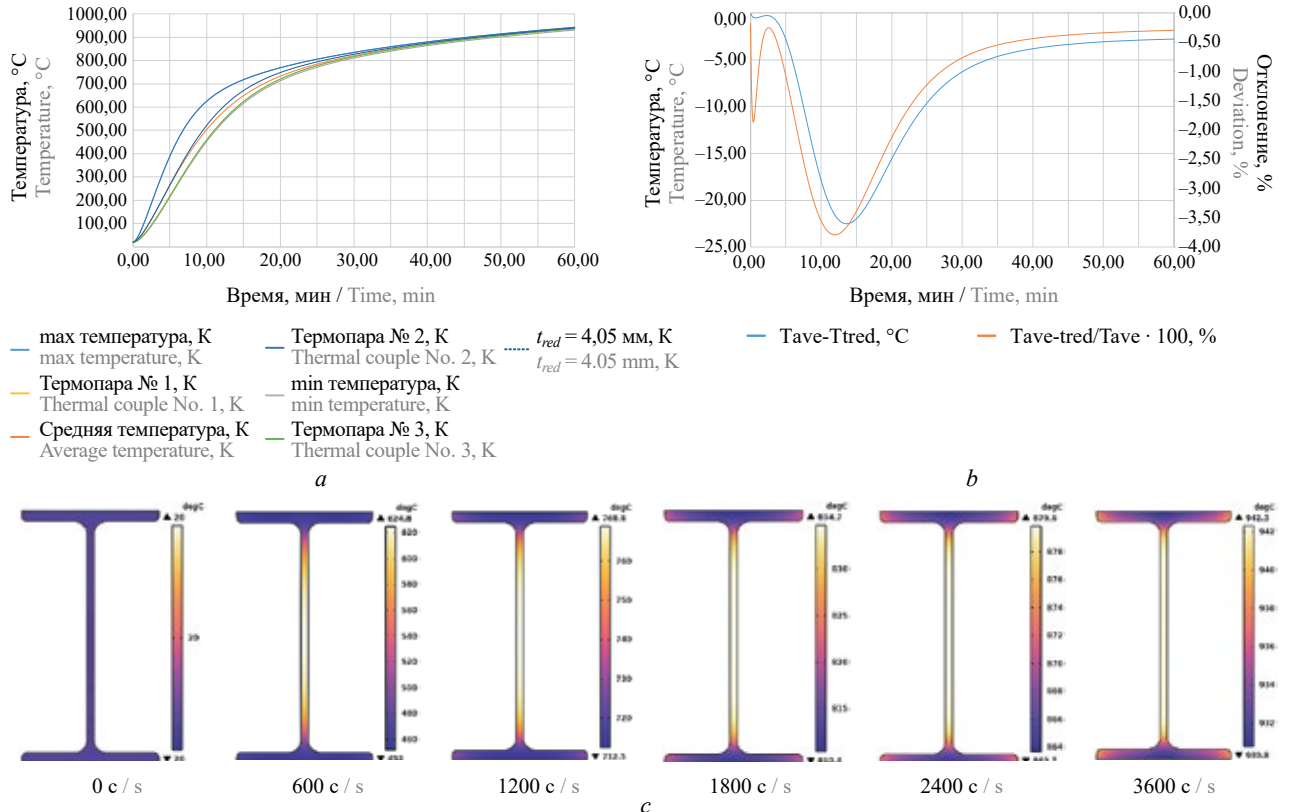
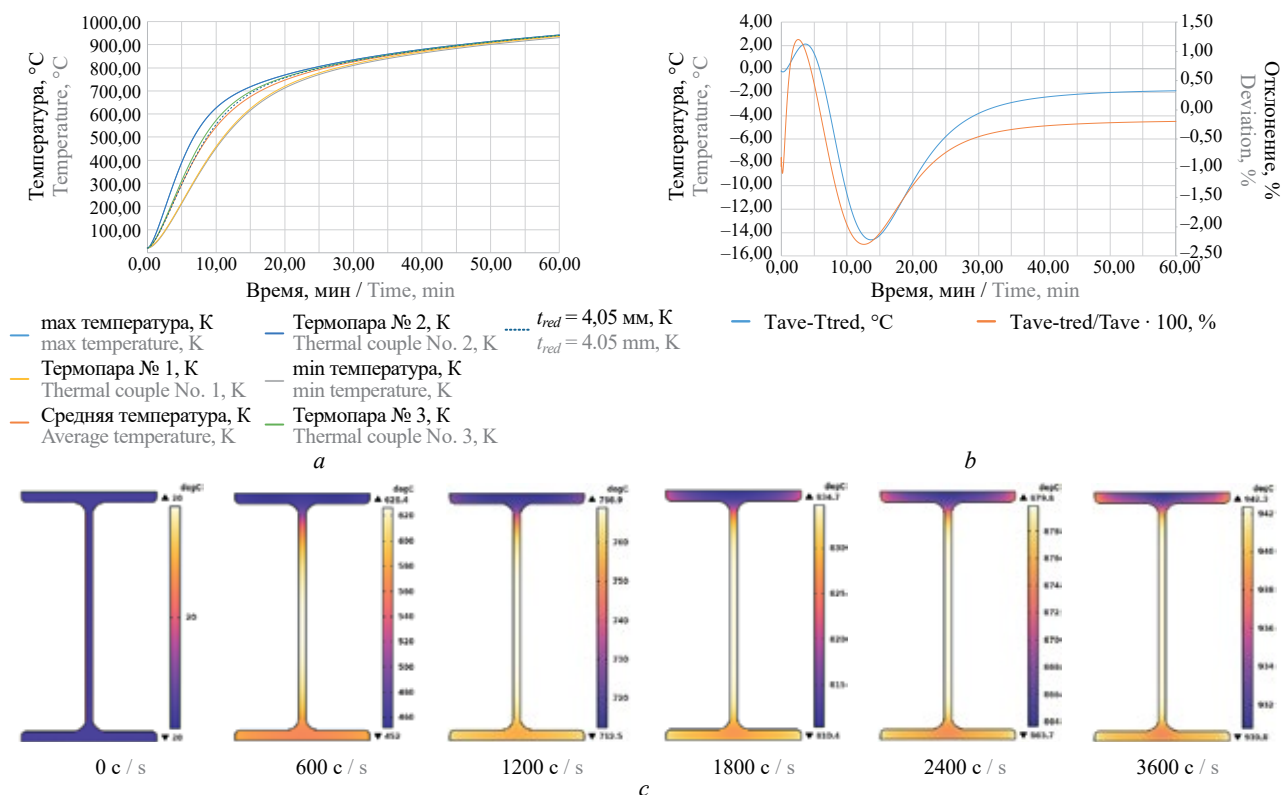


Рис. 13. Графики прогрева конструкции по 5-му варианту численного моделирования: *a* — графики прогрева конструкции; *b* — разница температур; *c* — температура в сечении конструкции ( $t_{red} = 4,76$  мм)

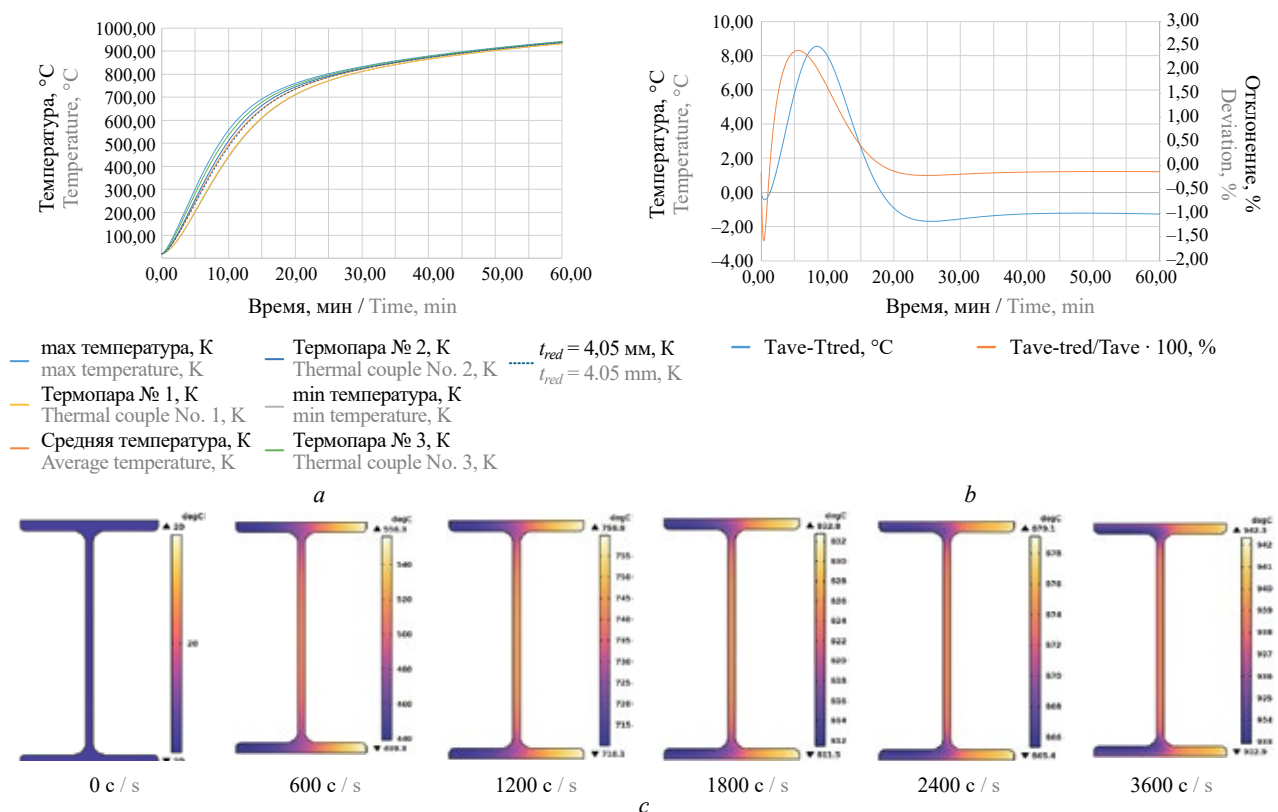
Fig. 13. Graphs of structure heating according to the 5th variant of numerical modelling: *a* — graphs of structure heating; *b* — temperature difference; *c* — temperature in the cross-section of the structure ( $t_{red} = 4.76$  mm)





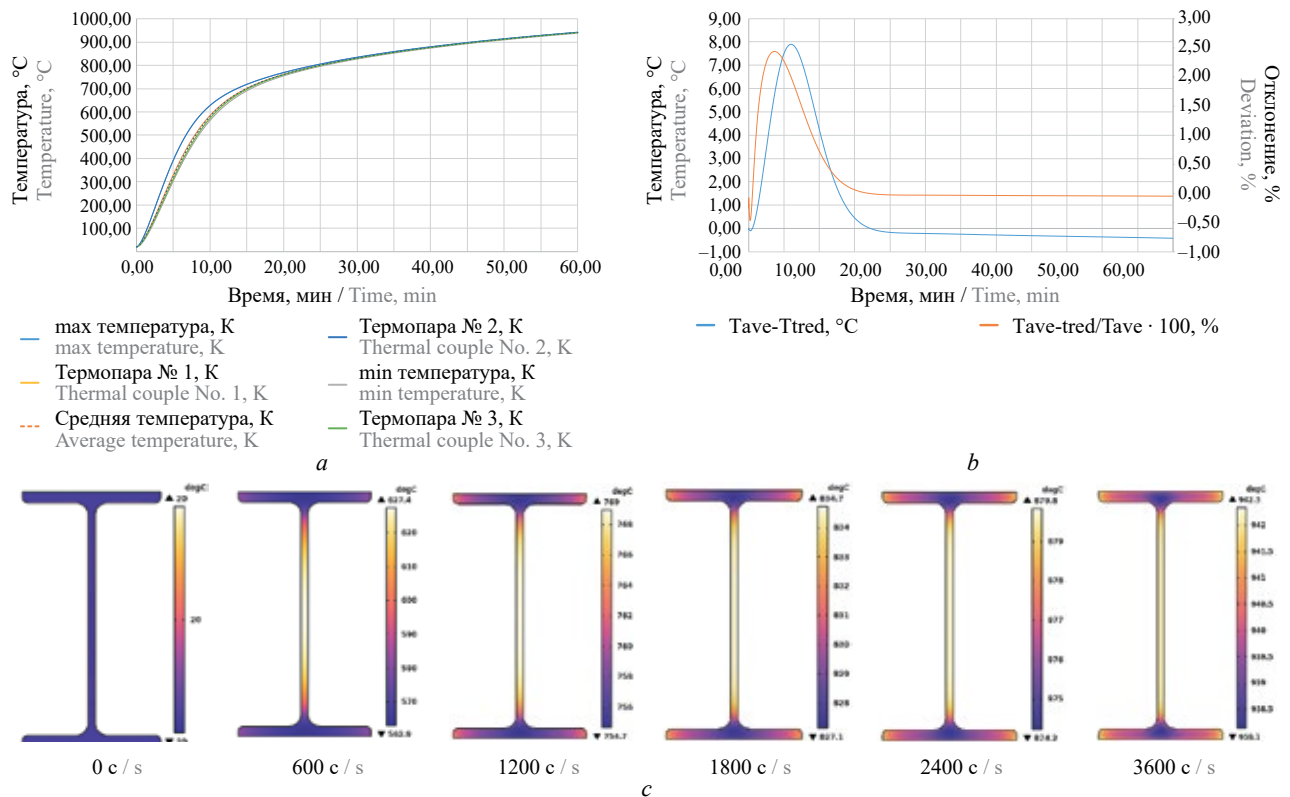
**Рис. 14.** Графики прогрева конструкции по 6-му варианту численного моделирования: *a* — графики прогрева конструкции; *b* — разница температур; *c* — температура в сечении конструкции ( $t_{red} = 4,05$  мм)

**Fig. 14.** Graphs of structure heating according to the 6th variant of numerical modelling: *a* — graphs of structure heating; *b* — temperature difference; *c* — temperature in the cross-section of the structure ( $t_{red} = 4,05$  mm)



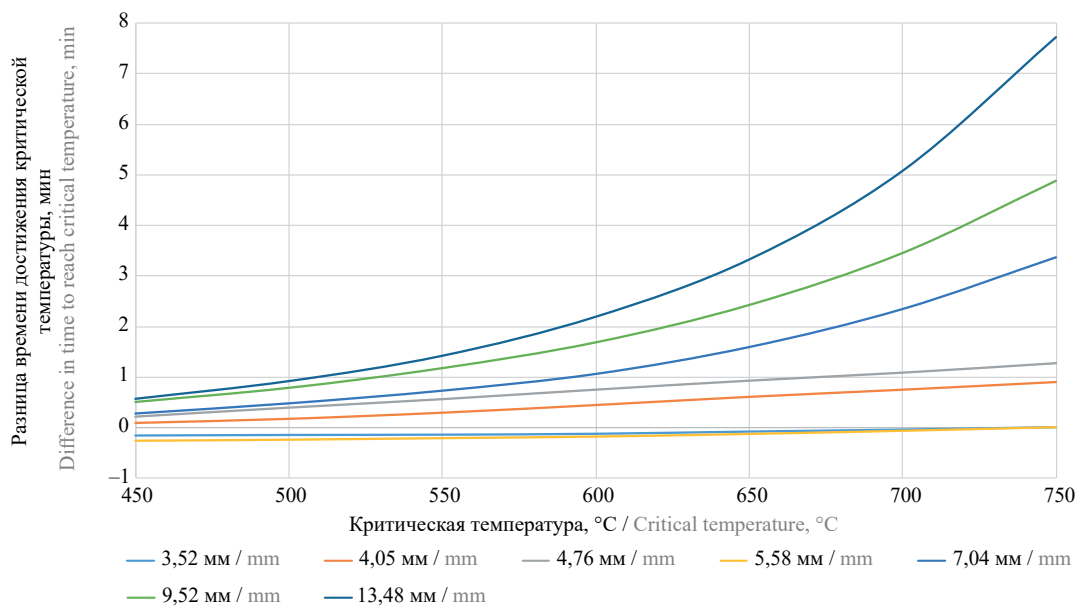
**Рис. 15.** Графики прогрева конструкции по 7-му варианту численного моделирования: *a* — графики прогрева конструкции; *b* — разница температур; *c* — температура в сечении конструкции ( $t_{red} = 5,58$  мм)

**Fig. 15.** Graphs of structure heating according to the 7th variant of numerical modelling: *a* — graphs of structure heating; *b* — temperature difference; *c* — temperature in the cross-section of the structure ( $t_{red} = 5,58$  mm)



**Рис. 16.** Графики прогрева конструкции по 8-му варианту численного моделирования: *a* — графики прогрева конструкции; *b* — разница температур; *c* — температура в сечении конструкции ( $t_{red} = 3,52$  мм)

**Fig. 16.** Graphs of structure heating according to the 8th variant of numerical modelling: *a* — graphs of structure heating; *b* — temperature difference; *c* — temperature in the cross-section of the structure ( $t_{red} = 3.52$  mm)



**Рис. 17.** Разница времени достижения критической температуры

**Fig. 17.** Difference in time to reach the critical temperature

## Выводы

В настоящее время при проектировании зданий и сооружений для решения различных задач применяют численное моделирование физических процессов, в том числе и численное моделирова-

ние прогрева стальных строительных конструкций в условиях высокотемпературного воздействия. Обоснованность увеличения доли численного моделирования при решении теплотехнических задач прогрева стальных строительных конструк-

ций объясняется рядом преимуществ по сравнению с физическим экспериментом.

Оценка сходимости полученных результатов моделирования прогрева стальной строительной конструкции двутаврового сечения методом конечных элементов и их валидация с известными расчетно-аналитическими решениями показали, что применение метода конечных элементов при выполнении теплотехнических расчетов в рамках разработки проектной документации по огнезащите стальных строительных конструкций имеет свои особенности, которые необходимо учитывать для получения требуемой точности решения, а именно:

- применение верифицированного и валидированного программного обеспечения;
- оценка возможности достижения сходимости решения задачи с учетом допустимой погрешности и существующими в наличии вычислительными ресурсами;
- обязательная оценка сходимости решения по шагам сетки и времени с учетом критерия сходимости решения задачи;
- интерпретация полученных результатов моделирования компетентным пользователем применяемого программного продукта.

### СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Фёдорова Н.Н., Вальгер С.А., Данилов М.Н., Захарова Ю.В. Основы работы в ANSYS 17 : уч. пособие. М. : ДМК Пресс, 2017. 210 с. EDN ZHIOB.
2. Анкудинов В.Е., Афлятунова Д.Д., Кривилев М.Д., Гордеев Г.А. Компьютерное моделирование процессов переноса и деформаций в сплошных средах : уч. пособие. 1-е изд. Ижевск : Изд-во «Удмуртский университет», 2014. 108 с. EDN VBZYDP.
3. Голованов В.И., Пехотиков А.В., Павлов В.В. Обзор рынка средств огнезащиты металлоконструкций. Преимущества и недостатки различных видов // Огнезащита XXI века : матер. Всеросс. науч.-практ. конф. М., 2014.
4. Пехотиков А.В. Актуальные вопросы применения средств огнезащиты для стальных конструкций // ЕВРОСТРОЙПРОФИ. 2015. № 79. С. 34–38.
5. Garlock M., Kruppa J., Li G.-Q., Zhao B. White paper on fire behavior of steel structures // NIST GCR 15-984. Gaithersburg, Maryland : NIST, 2014. 20 p. DOI: 10.6028/nist.gcr.15-984
6. 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. Vol. 95. Pp. 42–50. DOI: 10.1016/j.firesaf.2017.10.004
7. Мельдер Е.В., Сивенков А.Б. Эффективность комбинации интумесцентных покрытий для огнезащиты стальных конструкций // Технологии техносферной безопасности. 2022. № 1 (95). С. 49–65. DOI: 10.25257/TTS.2022.1.95.49-65. EDN YUXQQA.
8. Мешалкин Е.А., Болодьян Г.И. Проблемы применения средств огнезащиты // Ройтмановские чтения : матер. VIII науч.-практ. конф. М. : Академия ГПС МЧС России, 2020. С. 75–77. EDN LTXTEA.
9. Головина Е.В. Огнезащитная эффективность вспучивающихся покрытий, применяемых на промышленных предприятиях арктического региона // Современные проблемы обеспечения безопасности : сб. матер. XXV Междунар. науч.-практ. конф., Екатеринбург, 26–27 апреля 2023 года. Екатеринбург : Уральский институт Государственной противопожарной службы МЧС России, 2023. С. 13–15. EDN MQCNAF.
10. Tong C., Zhang S., Zhong T., Fang Z., Liu H. Highly fibrillated and intrinsically flame-retardant nanofibrillated cellulose forttransparent mineral filler-free fire-protective coatings // Chemical Engineering Journal. 2021. No. 419 (5). P. 129440. DOI: 10.1016/j.cej.2021.129440
11. Gatheeshgar P., Poologanathan K., Thamboo J., Roy K., Rossi B., Molken T. et al. On the fire behaviour of modular floors designed with optimised cold-formed steel joist // Structures. 2021. No. 30. Pp. 1071–1085. DOI: 10.1016/j.istruc.2021.01.055
12. Golovanov V., Kryuchkov G. Steel Structures Fire Resistance Assessment under Standardized Fire Temperature Regimes // Fires and Incidents: Prevention, Accident Response. 2021. No. 3. Pp. 52–60.
13. Carreras Guzman N.H., Kozine I., Lundteigen M.A. An integrated safety and security analysis for cyber-physical harm scenarios // Safety Science. 2021. No. 144 (0925). P. 105458. DOI: 10.1016/j.ssci.2021.105458
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. No. 42 (3). P. 102794. DOI: 10.1016/j.job.2021.102794
15. Smith T.D., DeJoy D. M., Dyal M.A., Pu Y., Dickinson S. Multi-level safety climate associations with safety behaviors in the fire service // Journal of Safety Research. 2019. No. 69 (2). Pp. 53–60. DOI: 10.1016/j.jsr.2019.02.005
16. Li P., Liu C., Wang B., Tao Y., Xu Y.-J., Liu Y. et al. Eco-friendly coating based on an intumescent flame-retardant system for viscose fabrics with multi-function properties: Flame retardancy, smoke suppression,

- and antibacterial properties // *Progress in Organic Coatings*. 2021. No. 159 (10). P. 06400. DOI: 10.1016/j.porgcoat.2021.106400
17. Morandini F, Santoni P.A., Tramoni J.B., Mell W.E. Experimental investigation of flammability and numerical study of combustion of shrub of rockrose under severe drought conditions // *Fire Safety Journal*. 2019. No. 108. P. 102836. DOI: 10.1016/j.firesaf.2019.102836
  18. Страхов В.Л., Гаращенко А.Н., Рудзинский В.П. Математическое моделирование работы и определение комплекса характеристик вспучивающейся огнезащиты // *Пожаровзрывобезопасность/Fire and Explosion Safety*. 1997. № 3. С. 21–30. EDN PEGZBN.
  19. Яковлев А.И. Расчет огнестойкости строительных конструкций. М. : Стройиздат, 1988. 143 с.
  20. Цвиркун С.В., Круковский П.Г. Идентификация теплофизических характеристик огнезащитных материалов по экспериментальным данным огневых испытаний // *Промышленная теплотехника*. 2004. Т. 26. № 6. С. 89–93.
  21. Волков Д.П., Кулиева Л.А., Успенская М.В., Токарев А.В. Исследование теплопроводности полимерных композиционных материалов // *Известия высших учебных заведений. Приборостроение*. 2009. Т. 52. № 1. С. 75–77. EDN JWZRKV.
  22. Зверев В.Г., Гольдин В.Д., Несмелов В.В., Цимбалюк А.Ф. Моделирование тепло- и массопереноса во вспучивающихся огнезащитных покрытиях // *Физика горения и взрыва*. 1998. Т. 34. № 2. С. 90–98. EDN MPACJB.
  23. Страхов В.Л., Гаращенко А.Н., Рудзинский В.П. Математическое моделирование работы огнезащиты, содержащей в своем составе воду // *Пожаровзрывобезопасность/Fire and Explosion Safety*. 1997. Т. 6. № 3. С. 21–30.
  24. Исаков Г.Н., Кузин А.Я., Перевалов А.В. Применение компьютерного моделирования при оценке огнезащитной эффективности покрытий // *Новое в экологии и безопасности жизнедеятельности : докл. на 2-й Всеросс. науч.-практ. конф. с междунар. участием*. Санкт-Петербург, 20–22 мая 1997. СПб., 1997. 98 с.
  25. Еремина Т.Ю. Моделирование и оценка огнезащитной эффективности вспучивающихся огнезащитных составов // *Пожаровзрывобезопасность/Fire and Explosion Safety*. 2003. № 5. С. 22–29.
  26. Головина Е.В., Беззапонная О.В., Акулов А.Ю. Методика оценки термостойкости огнезащитных составов интумесцентного типа для объектов нефтегазовой отрасли. Екатеринбург : Уральский институт ГПС МЧС России, 2020. 169 с.
  27. Голованов В.И., Пехотиков А.В., Павлов В.В. Оценка огнезащитной эффективности покрытий для стальных конструкций // *Пожарная безопасность*. 2020. № 4 (101). С. 43–54. DOI: 10.37657/vniipor.b.2020.101.4.004. EDN LRIOTI.
  28. Юдаев Б.Н. Техническая термодинамика. Теплопередача : учеб. неэнергетич. спец. вузов. М. : Высшая школа, 1988. 479 с.
  29. Крайнов А.Ю., Миньков Л.Л. Численные методы решения задач тепло- и массообмена : учеб. пособие. Томск : SST, 2016. 92 с.
  30. Томачаков М.М., Березовская И.Э. Анализ современного состояния решения обратных задач теплопроводности и их применения // *Universum: технические науки : электрон. научн. журн*. 2022. № 5 (98). URL: <https://7universum.com/ru/tech/arhive/item/13591/> DOI: 10.32743/UniTech.2022.98.5.13591
  31. Яковлев А.И. О расчете огнестойкости стальных конструкций на основе применения ЭВМ // *Огнестойкость строительных конструкций*. М. : ВНИИПО МВД СССР, 1973. Вып. 1. С. 3–18.
  32. Зайцев А.М., Болгов В.А. Численное моделирование прогрева строительных конструкций для определения коэффициента теплоотдачи при пожарах // *Вестник Воронежского института ГПС МЧС России*. 2015. № 1 (14). С. 18–25. EDN TSVNLR.
  33. Баширицев М.П. Задачник по теплопередаче в пожарном деле. М. : Изд-во ВШ МВД СССР, 1975. 228 с.
  34. Взрывобезопасность и огнестойкость в строительстве / под ред. Н.А. Стрельчука. М. : Стройиздат, 1970. 127 с.
  35. Молчадский И.С. Пожар в помещении. М. : ВНИИПО, 2005. 456 с.
  36. Минайлов Д.А. Исследование огнестойкости стальных конструкций покрытия складских зданий в условиях различного температурного воздействия // *Пожаровзрывобезопасность/Fire and Explosion Safety*. 2020. Т. 29. № 3. С. 54–65. DOI: 10.22227/PVB.2020.29.03.54-65
  37. Perera D., Upasiri I.R., Poologanathan K., Gatheeshgar P., Sherlock P., Hewavitharana T. et al. Energy performance of fire rated LSF walls under UK climate conditions // *Journal of Building Engineering*. 2021. No. 44 (3). P. 103293. DOI: 10.1016/j.job.2021.103293



38. De Silva D., Nuzzo I., Nigro E., Occhiuzzi A. Intumescent Coatings for Fire Resistance of Steel Structures: Current Approaches for Qualification and Design // *Coatings*. 2022. No. 12. P. 696. DOI: 10.3390/coatings12050696
39. De Silva D., Bilotta A., Nigro E. Approach for modelling thermal properties of intumescent coating applied on steel members // *Fire Safety Journal*. 2020. No. 116. P. 103200. DOI: 10.1016/j.firesaf.2020.103200
40. Zhang C., Li G.Q., Wang Y.-C. Probabilistic analysis of steel columns protected by intumescent coatings subjected to natural fires // *Structural Safety*. 2014. No. 5. Pp. 16–26. DOI: 10.1016/j.strusafe.2014.03.005
41. Еремина Т.Ю., Минайлов Д.А. Исследование влияния температурного режима пожара на эффективность вспучивающегося огнезащитного покрытия, предназначенного для огнезащиты стальных конструкций // *Пожаровзрывобезопасность/Fire and Explosion Safety*. 2023. Т. 32. № 2. С. 44–58. DOI: 10.22227/0869-7493.2023.32.02.44-58. EDN LWVMZJ.
42. Beh J.H., Yew M.C., Saw L.H., Yew M.K. Fire Resistance and Mechanical Properties of Intumescent Coating Using Novel BioAsh for Steel // *Coatings*. 2020. No. 10. P. 1117. DOI: 10.3390/coatings10111117
43. Lucherini A., Maluk C. Intumescent coatings used for the fire-safe design of steel structures : a review // *Journal of Constructional Steel Research*. 2019. No. 162 (9). P. 105712. DOI: 10.1016/j.jcsr.2019.105712

## REFERENCES

1. Fedorova N.N., Walger S.A., Danilov M.N., Zakharova Yu.V. *Fundamentals of work in ANSYS 17*. Moscow, DMK Press, 2017; 210. EDN ZIIIOB. (rus).
2. Ankudinov V.E., Aflyatunova D.D., Krivilev M.D., Gordeev G.A. *Computer modeling of transfer and deformation processes in continuous media : a textbook. 1st edition*. Izhevsk, Udmurt University Publishing House, 2014; 108. EDN VBZYDP. (rus).
3. Golovanov V.I., Pekhotikov A.V., Pavlov V.V. *Market overview of fire protection products for metal structures. Advantages and disadvantages of various types*. Moscow, Proceedings of the All-Russian scientific and practical conference “Fire Protection of the XXI century”, 2014. (rus).
4. Pekhotikov A.V. Topical issues of the use of fire protection products for steel structures. *Eurostroyprofi*. 2015; 79:34-38. (rus).
5. Garlock M., Kruppa J., Li G.-Q., Zhao B. White paper on fire behavior of steel structures. *NIST GCR 15-984*. Gaithersburg, Maryland, NIST, 2014; 20. DOI: 10.6028/nist.gcr.15-984
6. 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
7. Melder E.V., Sivenkov A.B. The effectiveness of a combination of intumescent coatings for fire protection of steel structures. *Technosphere safety technologies*. 2022; 1(95):49-65. DOI: 10.25257/TTS.2022.1.95.49-65. EDN YUXQQA. (rus).
8. Meshalkin E.A., Bolodyan G.I. Problems of using fire protection products. *Roitman readings : mater. VIII scientific and practical conference*. Moscow, Academy of GPS of the Ministry of Emergency Situations of Russia, 2020; 75-77. EDN LTXTEA. (rus).
9. Golovina E.V. Flame-retardant effectiveness of bulging coatings used in industrial enterprises of the Arctic region. *Modern security issues : Proceedings of the XXV International Scientific and Practical Conference, Yekaterinburg, April 26-27, 2023*. Yekaterinburg, Ural Institute of the State Fire Service of the Ministry of Emergency Situations of Russia, 2023; 13-15. EDN MQCNAF. (rus).
10. Tong C., Zhang S., Zhong T., Fang Z., Liu H. Highly fibrillated and intrinsically flame-retardant nanofibrillated cellulose for transparent mineral filler-free fire-protective coatings. *Chemical Engineering Journal*. 2021; 419(5):129440. DOI: 10.1016/j.cej.2021.129440
11. Gatheeshgar P., Poologanathan K., Thamboo J., Roy K., Rossi B., Molkens T. et al. On the fire behaviour of modular floors designed with optimised cold-formed steel joist. *Structures*. 2021; 30:1071-1085. DOI: 10.1016/j.istruc.2021.01.055
12. Golovanov V., Kryuchkov G. Steel Structures Fire Resistance Assessment under Standardized Fire Temperature Regimes. *Fires and Incidents: Prevention, Accident Response*. 2021; 3:52-60.
13. Carreras Guzman N.H., Kozine I., Lundteigen M.A. An integrated safety and security analysis for cyber-physical harm scenarios. *Safety Science*. 2021; 144(0925):105458. DOI: 10.1016/j.ssci.2021.105458
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(3):102794. DOI: 10.1016/j.jobbe.2021.102794

15. Smith T.D., DeJoy D.M., Dyal M.A., Pu Y., Dickinson S. Multi-level safety climate associations with safety behaviors in the fire service. *Journal of Safety Research*. 2019; 69(2):53-60. DOI: 10.1016/j.jsr.2019.02.005
16. Li P., Liu C., Wang B., Tao Y., Xu Y.-J., Liu Y. et al. Eco-friendly coating based on an intumescent flame-retardant system for viscose fabrics with multi-function properties: Flame retardancy, smoke suppression, and antibacterial properties. *Progress in Organic Coatings*. 2021; 159(10):06400. DOI: 10.1016/j.porgcoat.2021.106400
17. Morandini F., Santoni P.A., Tramoni J.B., Mell W.E. Experimental investigation of flammability and numerical study of combustion of shrub of rockrose under severe drought conditions. *Fire Safety Journal*. 2019; 108:102836. DOI: 10.1016/j.firesaf.2019.102836
18. Strakhov V.L., Garashchenko A.N., Rudzinsky V.P. Mathematical modeling of operation and determination of complex characteristics of bulging fire protection. *Fire and explosion safety*. 1997; 3:21-30. EDN PEGZBN. (rus).
19. Yakovlev A.I. *Calculation of fire resistance of building structures*. Moscow, Stroyizdat, 1988; 143. (rus).
20. Tsvirkun S.V., Krukovsky P.G. Identification of thermophysical characteristics of flame-retardant materials based on experimental fire test data. *Industrial Heat engineering*. 2004; 26(6):89-93. (rus).
21. Volkov D.P., Kulieva L.A., Uspenskaya M.V., Tokarev A.V. Investigation of thermal conductivity of polymer composite materials. *News of higher educational institutions. Instrument engineering*. 2009; 52(1):75-77. (rus).
22. Zverev V.G., Goldin V.D., Nesmelov V.V., Tsybalyuk A.F. Modeling of heat and mass transfer in bulging flame-retardant coatings. *Physics of combustion and explosion*. 1998; 34(2):90-98. EDN MPACJB. (rus).
23. Strakhov V.L., Garashchenko A.N., Rudzinsky V.P. Mathematical modeling of fire protection containing water in its composition. *Pozharovzryvobezopasnost/Fire and explosion safety*. 1997; 6(3):21-30. (rus).
24. Isakov G.N., Kuzin A.Ya., Perevalov A.V. Application of computer modeling in assessing the flame-retardant effectiveness of coatings. *Dokl. 2 All-Russian Scientific and Practical conference with international with the participation of "New in ecology and life safety". Saint Petersburg, May 20-22, 1997*. St. Petersburg, 1997; 98. (rus).
25. Eremina T.Yu. Modeling and evaluation of the flame-retardant effectiveness of bulging flame retardants. *Pozharovzryvobezopasnost/Fire and explosion safety*. 2003; 5:22-29. (rus).
26. Golovina E.V., Bezzaponnaya O.V., Akulov A.Yu. *Methodology for assessing the heat resistance of intumescent flame retardants for oil and gas industry facilities*. Yekaterinburg, 2020; 173. (rus).
27. Golovanov V.I., Pekhotikov A.V., Pavlov V.I. Evaluation of flame-retardant effectiveness of coatings for steel structures. *Fire safety*. 2020; 4(101):43-54. DOI: 10.37657/vniipo.pb.2020.101.4.004. EDN LRIOTI. (rus).
28. Yudaev B.N. *Technical thermodynamics. Heat transfer : textbook of non-energy spec. universities*. Moscow, Higher School, 1988; 479. (rus).
29. Krainov A.Yu., Minkov L.L. *Numerical methods for solving problems of heat and mass transfer : textbook stipend*. Tomsk, SST, 2016; 92. (rus).
30. Tomochakov M.M., Berezovskaya I.E. Analysis of the current state of solving inverse problems of heat conduction and their application. *Universum: technical sciences : electronic. scientific journal*. 2022; 5(98). URL: <https://7universum.com/ru/tech/arhive/item/13591/> (rus).
31. Yakovlev A.I. On the calculation of fire resistance of steel structures based on the use of computers. *Fire resistance of building structures*. Moscow, VNIPO of the USSR Ministry of Internal Affairs, 1973; 1:3-18. (rus).
32. Zaitsev A.M., Bolgov V.A. Numerical modeling of heating of building structures to determine the coefficient of heat transfer in case of fires. *Bulletin of the Voronezh Institute of GPS of the Ministry of Emergency Situations of Russia*. 2015; 1(14):19-26. EDN TSVNLR. (rus).
33. Bashkirtsev M.P. *Task book on heat transfer in firefighting*. Moscow, Publishing House of the Higher School of Internal Affairs of the USSR, 1975; 228. (rus).
34. *Explosion safety and fire resistance in construction* / ed. by N.A. Strelchuk. Moscow, Stroyizdat, 1970; 127. (rus).
35. Molchadskiy I.S. *Fire in the room*. Moscow, VNIPO, 2005; 456. (rus).
36. Minailov D.A. Investigation of fire resistance of steel structures covering warehouse buildings under various temperature conditions. *Pozharovzryvobezopasnost/Fire and Explosion Safety*. 2020; 29(3):54-65. DOI: 10.22227/PVB.2020.29.03.54-65 (rus).
37. Perera D., Upasiri I.R., Poologanathan K., Gatheeshgar P., Sherlock P., Hewavitharana T. et al. Energy performance of fire rated LSF walls under UK climate conditions. *Journal of Building Engineering*. 2021; 44(3):103293. DOI: 10.1016/j.job.2021.103293
38. De Silva D., Nuzzo I., Nigro E., Occhiuzzi A. Intumescent Coatings for Fire Resistance of Steel Structures: Current Approaches for Qualification and Design. *Coatings*. 2022; 12:696. DOI: 10.3390/coatings12050696

39. De Silva D., Bilotta A., Nigro E. Approach for modelling thermal properties of intumescent coating applied on steel members. *Fire Safety Journal*. 2020; 116:103200. DOI: 10.1016/j.firesaf.2020.103200
40. Zhang C., Li G.Q., Wang Y.-C. Probabilistic analysis of steel columns protected by intumescent coatings subjected to natural fires. *Structural Safety*. 2014; 5:16-26. DOI: 10.1016/j.strusafe.2014.03.005
41. Eremina T.Yu., Minailov D.A. Investigation of the effect of the fire temperature regime on the effectiveness of a bulging flame-retardant coating intended for fire protection of steel structures. *Pozharovzryvbezopasnost/Fire and explosion safety*. 2023; 32(2):44-58. DOI: 10.22227/0869-7493.2023.32.02.44-58. EDN LWVMZJ. (rus).
42. Beh J.H., Yew M.C., Saw L.H., Yew M.K. Fire Resistance and Mechanical Properties of Intumescent Coating Using Novel BioAshfor Steel. *Coatings*. 2020; 10:1117. DOI: 10.3390/coatings1011117
43. Lucherini A., Maluk C. Intumescent coatings used for the fire-safe design of steel structures : a review. *Journal of Constructional Steel Research*. 2019; 162(9):105712. DOI: 10.1016/j.jcsr.2019.105712

Поступила 14.11.2024, после доработки 09.01.2025;

принята к публикации 11.01.2025

Received November 14, 2024; Received in revised form January 9, 2025;

Accepted January 11, 2025

### Информация об авторах

**ЕРЕМИНА Татьяна Юрьевна**, д.т.н., профессор кафедры комплексной безопасности в строительстве, Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет, Россия, 129337, г. Москва, Ярославское шоссе, 26; ORCID: 0000-0003-1427-606X; Scopus AuthorID: 56893573700; e-mail: da-vip@mail.ru

**МИНАЙЛОВ Денис Александрович**, начальник научно-исследовательского сектора отдела 2.4, Всероссийский ордена «Знак Почета» научно-исследовательский институт противопожарной обороны Министерства Российской Федерации по делам гражданской обороны, чрезвычайным ситуациям и ликвидации последствий стихийных бедствий, Россия, 143903, Московская обл., г. Балашиха, мкр. ВНИИПО, 12; ORCID: 0000-0001-9811-3908; ResearcherID: AAI-2064-2020; Scopus AuthorID: 57207307581; e-mail: minailov-denis@mail.ru

#### Вклад авторов:

**Еремина Т.Ю.** — научное руководство; концепция исследования.

**Минайлов Д.А.** — проведение математического моделирования; написание исходного текста и доработка текста статьи.

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

### Information about the authors

**Tayana Yu. EREMINA**, Dr. Sci. (Eng.), Professor of Department of Integrated Safety in Civil Engineering, Moscow State University of Civil Engineering (National Research University), Yaroslavl'shoss, 26, Moscow, 129337, Russian Federation; ORCID: 0000-0003-1427-606X; Scopus AuthorID: 56893573700; e-mail: da-vip@mail.ru

**Denis A. MINAILOV**, Head of the Research Sector of Department 2.4, All-Russian Research Institute for Fire Protection of Ministry of Russian Federation for Civil Defense, Emergencies and Elimination of Consequences of Natural Disasters, VNIIPO, 12, Balashikha, Moscow Region, 143903, Russian Federation; ORCID: 0000-0001-9811-3908; ResearcherID: AAI-2064-2020; Scopus AuthorID: 57207307581; e-mail: minailov-denis@mail.ru

#### Contribution of the authors:

**Eremina T.Yu.** — scientific guidance; research concept.

**Minailov D.A.** — research; writing the source text and finalizing the text of the article.

The authors declare no conflicts of interests.

ПОЖАРОВЗРЫВБЕЗОПАСНОСТЬ/FIRE AND EXPLOSION SAFETY. 2025. Т. 34. № 1. С. 59–69  
POZHAROVZRYVOBEZOPASNOST/FIRE AND EXPLOSION SAFETY. 2025; 34(1):59-69

НАУЧНАЯ СТАТЬЯ/RESEARCH PAPER

УДК 614.842.8

<https://doi.org/10.22227/0869-7493.2025.34.01.59-69>

# Методика оценки рисков в системе комплексной безопасности, предназначенной для предупреждения аварий и пожаров на взрывопожароопасных предприятиях

Евгений Владимирович Гвоздев ✉

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

## АННОТАЦИЯ

**Введение.** Представлено обоснование и сформировано направление для проведения научного исследования, связанного с изучением новых свойств управляемой системы, в которой осуществляется сложный процесс по влиянию персонала отдельных видов безопасности и персонала производственных структурных подразделений на общее состояние системы комплексной безопасности.

**Цель и задачи.** Основная цель состоит в разработке методики оценки рисков, предназначенной для совершенствования системы комплексной безопасности на взрывопожароопасных предприятиях. Для решения трех научных задач по оценке рисков, оказывающих влияние на общее состояние системы комплексной безопасности, определены следующие направления:

- для решения первой задачи требуется получение результатов оценки рисков при влиянии персонала, работающего на предприятиях, на общее состояние системы;
- для решения второй задачи требуется получение результатов оценки рисков при влиянии невыполненных мероприятий на общее состояние системы;
- для решения третьей задачи требуется представление обоснованности для результатов, полученных при решении первой и второй научных задач.

**Методы.** Для решения задач обосновано использование экспертных методов, которые позволят преобразовать качественные характеристики в количественную меру. Обосновано использование метода ранжирования приоритетов, используемого совместно с функционалом вероятностного распределения Гаусса. Предложено использовать пятиразрядную пропорционально убывающую матрицу для оценки рисков при невыполнении требований нормативных правовых актов (НПА) и нормативных документов (НД).

**Выводы.** 1. Представлено обоснование по применению группы экспертных методов, использование которых позволяет получить показатели влияния персонала, работающего на предприятиях, на общее состояние системы комплексной безопасности. 2. Продемонстрирован пример, позволяющий доказать адекватность использования группы экспертных методов, их возможности в использовании на практике для оценки рисков.

**Ключевые слова:** методика оценки; состояние системы; качество влияния; информационная модель; эмерджентность

**Для цитирования:** Гвоздев Е.В. Методика оценки рисков в системе комплексной безопасности, предназначенной для предупреждения аварий и пожаров на взрывопожароопасных предприятиях // Пожаровзрывобезопасность/Fire and Explosion Safety. 2025. Т. 34. № 1. С. 59–69. DOI: 10.22227/0869-7493.2025.34.01.59-69

✉ Гвоздев Евгений Владимирович, e-mail: [evgvozdev@mail.ru](mailto:evgvozdev@mail.ru)

# Methodology of risk assessment in the system of integrated safety designed to prevent accidents and fires at explosion and fire hazardous enterprises

Evgeniy V. Gvozdev ✉

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

## ABSTRACT

**Introduction.** Substantiation is presented and the direction for scientific research related to the study of new properties of the controlled system, in which a complex process of influence of the personnel of separate types of security and personnel of production structural units on the general state of the system of complex security is carried out.



**Aim and objectives.** The main objective is to develop a risk assessment methodology designed to improve the system of integrated safety at explosion and fire hazardous enterprises. To solve the three scientific tasks on the assessment of risks influencing the general condition of the system of complex safety, the following directions are defined:

- to solve the first task requires obtaining the results of risk assessment in the influence of personnel working at the enterprises on the general state of the system;
- to solve the second task requires the results of risk assessment of the impact of unimplemented measures on the overall state of the system;
- to solve the third task requires the presentation of validity for the results obtained by solving the first and second scientific tasks.

**Methods.** For the decision of problems use of expert methods which will allow to transform qualitative characteristics in a quantitative measure is grounded. The use of the method of prioritization used together with the Gauss probability distribution functional is justified. It is suggested to use a five-digit proportionally decreasing matrix for risk assessment in case of non-compliance with the requirements of normative legal acts (NLA) and normative documents (ND).

**Conclusions.** 1. The justification for the application of a group of expert methods, the use of which allows to obtain indicators of the impact of personnel working at enterprises on the overall state of the system of integrated security is presented. 2. The example, allowing to prove adequacy of use of group of expert methods, their possibilities in use in practice for an estimation of risks is demonstrated.

**Keywords:** evaluation methodology; system state; quality of influence; information model; emergent nature

**For citation:** Gvozdev E.V. Methodology of risk assessment in the system of integrated safety designed to prevent accidents and fires at explosion and fire hazardous enterprises. *Pozharovzryvobezopasnost/Fire and Explosion Safety*. 2025; 34(1):59-69. DOI: 10.22227/0869-7493.2025.34.01.59-69 (rus).

✉ Evgeniy Vladimirovich Gvozdev, e-mail: evgvozdev@mail.ru

## Введение

Ущербы от аварий и пожаров, которые ежегодно возникают на взрывопожароопасных (ВПО) предприятиях, требуют пристального внимания при оценке рисков в системе комплексной безопасности (СКБ), которую целесообразно создавать на всех производственных предприятиях. Результатом проводимых комиссионных расследований аварий<sup>1</sup> и пожаров<sup>2</sup> на ВПО предприятиях является сформулированное экспертами качественное представление в отчетах причинно-следственных факторов, которые оказали результирующее влияние на исход реализации итогового опасного события (ОС) аварии или пожара. Например, в отчетах об авариях на предприятиях (уроки, извлеченные из аварий) представляется информационная справка с кратким описанием аварии, ее последствий, причин ее возникновения. В последнем блоке выделены два направления: технические и организационные причины. Новые научные результаты с описанием рисков, относящихся к техническим причинам, представляются в монографических сборниках «Безопасность России», которые издаются ежегодно при содействии РАН. Для представления научной новизны в статье сосредоточено внимание на рисках, относящихся к организационным причинам, проявление которых создает

благоприятные условия для возникновения аварий и пожаров на ВПО предприятиях.

В статье представлено обоснование целесообразности создания на ВПО предприятиях СКБ, в содержании которой рассматривается связь между взаимодействующими отдельными видами деятельности (ВД), осуществляющими контроль, такими как пожарная безопасность (ПБ); промышленная безопасность (ПрБ); охрана труда (ОТ) [1]. В структурном содержании СКБ в качестве главного контингента деятельности по предупреждению аварий и пожаров рассматривается персонал производственных структурных подразделений (ПСП), так как он выполняет трудовые обязанности на ВПО предприятиях (рис. 1).

Для безопасного функционирования ВПО предприятий осуществляется контроль за исполнением требований, утвержденных и изложенных в нормативных правовых актах (НПА) и нормативных документах (НД) для отдельных ВД (ПрБ; ПБ; ОТ), которые исполняются персоналом ПСП. Все мероприятия по контролю, проводимые отдельными ВД (ПрБ; ПБ; ОТ), направлены для снижения рисков нанесения ущербов от ОС (аварий и пожаров).

В статье сосредоточено внимание на интенсивности влияния  $\lambda_{вд}$  потоками управления для менеджеров отдельных ВД (ПрБ; ПБ; ОТ) и ПСП, когда необходим прямой контроль со стороны менеджеров СКБ. Разработана модель влияния персонала отдельных ВД (ПрБ; ПБ; ОТ) на деятельность персонала ПСП в составе СКБ, функционирующей на ВПО предприятиях (рис. 2).

В содержании представленной модели (рис. 2) при отсутствии органа управления (ОУ) СКБ все

<sup>1</sup> Об утверждении Порядка проведения технического расследования причин аварий, инцидентов и случаев утраты взрывчатых материалов промышленного назначения : Приказ Ростехнадзора от 8 декабря 2020 г. № 503.

<sup>2</sup> Об утверждении Регламента работы в информационной системе «Автоматизированная аналитическая система поддержки и управления контрольно-надзорными органами МЧС России» : Приказ МЧС России от 2 ноября 2023 г. № 1148.

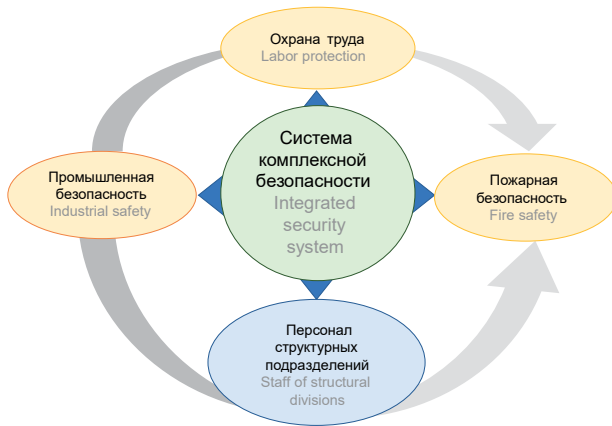


Рис. 1. Многоуровневая СКБ, объединяющая направления безопасности (ПБ; ПрБ; ОТ; ПСП)

Fig. 1. A multi-level ISS that combines security areas (FS; IS; LP; PSU)

мероприятия:  $(m_1^1, m_2^1, \dots, m_1^2, m_2^2, \dots, m_n^2; m_1^3, m_2^3, \dots, m_n^3)$  по контролю отдельными ВД (ПрБ; ПБ; ОТ) по отношению к персоналу ПСП будут реализовываться автономно, т.е. в каждом ВД будет существовать высокая вероятность возникновения рисков и их проявления в конечном опасное событие (аварию и пожар). В результате недоработки в одном ВД (ПрБ или ПБ) могут быть нанесены ущербы другим ВД (ПрБ; ПБ; ОТ), а также персоналу ПСП. При создании ОУ СКБ, в котором будут выявлены все неблагоприятные риски нанесения ущерба от аварий и пожаров, соответственно, в этом ОУ верхнего уровня будет осуществляться координация управляющего влияния, это позволит перевести СКБ на новый уровень устойчивого функционирования и развития. На рис. 2 наглядно обосновывается целесообразность создания и функционирования

на ВПО предприятиях СКБ, благодаря которой образуется ОУ верхнего уровня, который будет порождать эмерджентные свойства —  $S_i$ , такие как качество влияния персонала отдельных ВД (ПрБ; ПБ; ОТ) и персонала ПСП на общее состояние СКБ.

Под рисками нанесения ущерба от аварий и пожаров применительно к персоналу всех направлений безопасности (НБ) (ПрБ; ПБ; ОТ; ПСП) будем понимать его неправильные действия (недоработки), рассматриваемые как иницирующие события, которые при благоприятных условиях могут привести к возникновению ОС (аварий и пожаров).

Сформировано новое научное направление, в котором предприняты попытки исследовать новые свойства, которыми наделена СКБ, т.е. изучить сложный процесс по влиянию персонала отдельных ВД (ПБ; ПрБ; ОТ) и персонала ПСП на ее (СКБ) общее состояние.

### Цель и задачи исследования

Цель представляемой статьи состоит в разработке методики оценки рисков в СКБ, предназначенной для предупреждения аварий и пожаров на ВПО предприятиях (далее — *методика*). В качестве *объекта исследования* рассматривается СКБ, функционирующая на ВПО предприятиях, в содержание которой входит персонал ПСП, а также персонал, задействованный в системе управления промышленной безопасностью (СУПБ); в системе обеспечения пожарной безопасности (СОПБ); системе управления охраной труда (СУОТ) (рис. 3).

В качестве *предмета исследования* рассматривается процесс в получении результатов оценки рисков, проявляемых в ОС (аварии и пожары), с использованием *методики*.

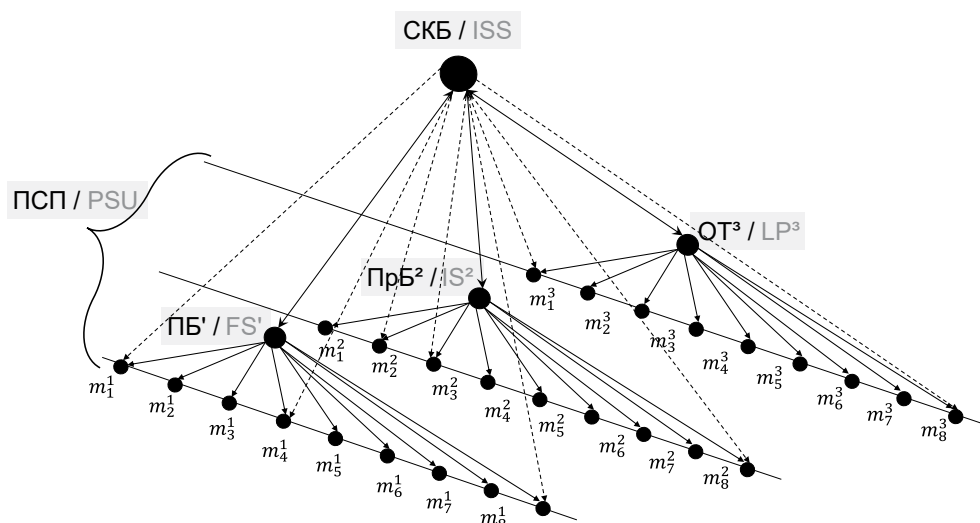
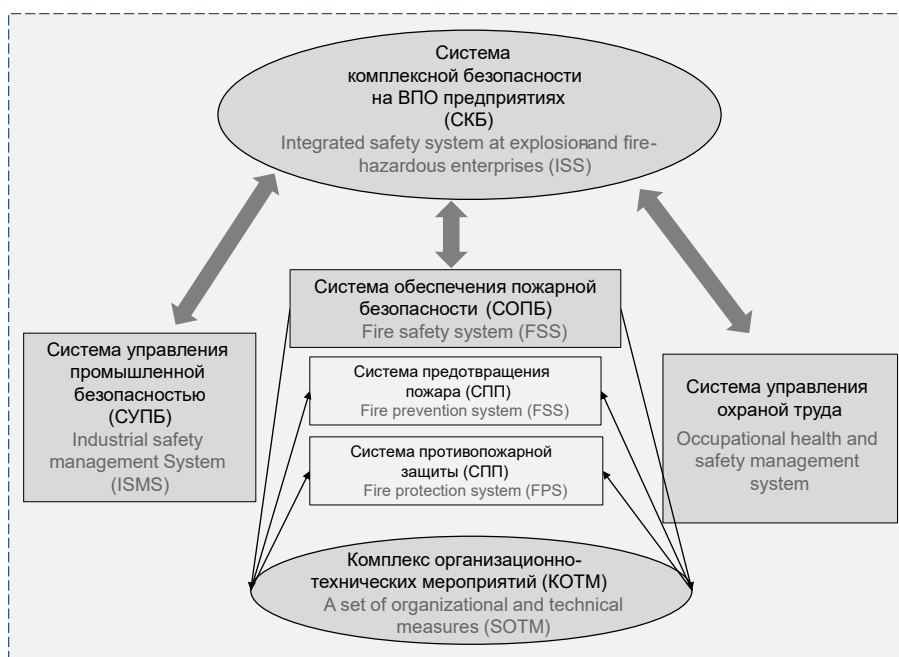


Рис. 2. Многоуровневая СКБ, объединяющая направления безопасности (ПБ; ПрБ; ОТ; ПСП)

Fig. 2. A multi-level ISS that combines security areas (FS; IS; LP; PSU)



**Рис. 3.** Содержание структурных компонентов, входящих в СКБ  
**Fig. 3.** The content of the structural components included in the ISS

Первая задача связана с оценкой рисков при влиянии персонала отдельных ВД (ПрБ; ПБ; ОТ) и персонала (ПСП) на общее состояние СКБ. В ходе решения второй задачи требуется продемонстрировать последовательность проведения мероприятий по оценке рисков влияния невыполненных мероприятий на общее состояние СКБ. Проверить на адекватность результаты оценки рисков с точки зрения вероятности и закономерности их проявления. Представить информацию по достоверности и чувствительности при обработке входных данных для оценки рисков.

Очевидно, что статистика возникновения ОС (аварий и пожаров) пополняется не персоналом, осуществляющим контроль в отдельных ВД (ПрБ; ПБ; ОТ), а в основном персоналом ПСП. Анализировались аварии и пожары на предприятиях нефтегазового комплекса (НГК) России (период 2014–2022 гг.)<sup>3</sup> были выявлены очевидные недостатки (недоработки) как в отношении персонала отдельных ВД (ПрБ; ПБ; ОТ), так и в отношении персонала ПСП.

### Решение научной задачи № 1

Эффективность решений, принимаемых ОУ СКБ по отношению к поставленной задаче, базируется на знаниях о методах оценки рисков, которые используются как в отдельных ВД (ПрБ; ПБ; ОТ), так и в области эффективного управления СКБ. При выборе наилучшего средства и способа для достиже-

ния сформулированной цели лицом, принимающим решение (ЛПР), возникает сложность оценки состояния СКБ по нескольким частным критериям, учета корректности этих оценок. Смыслом намеченной сформулированной цели будет являться содержание частных критериев, адекватная оценка для которых будет получена с учетом важности, весомости и ценности значений при их совместном рассмотрении и обобщении.

В исследованиях по принятию решений, в основном при наличии множества альтернатив для перспективных действий, считается целесообразным использовать обоснованные методы, с помощью которых будут получены (наилучшие, оптимальные) результаты. В начале выбор методов определения коэффициента важности оценки частных критериев осуществляется на основе классификации [2] (табл. 1).

Для выбора предпочтительных методов целесообразно использовать инструменты системного анализа, а на его основе осуществлять выбор методов экспертного оценивания [3]. Многовариантная сложная задача по управлению СКБ на предприятии будет решена в том случае, когда появится возможность разработать план, реализуемый в перспективе [4], и когда решение ОУ СКБ будет базироваться на практическом использовании расчетных инструментов, разработанных на основе постановки и решения научных задач [5, 6]. Элементы, методы (приемы) системного анализа даны на рис. 4 [7].

По мнению авторов научного исследования [8], экспертные методы в настоящее время приобретают общепризнанную популярность в дискретном алго-

<sup>3</sup> URL: <https://www.gosnadzor.ru/industrial/oil/lessons/> (дата обращения: 12.02.2025).

**Таблица 1.** Определение коэффициентов важности с учетом иерархической классификации методов

Table 1. Determination of importance coefficients based on the hierarchical classification of methods

Классы / Classes		
1-й класс — первичные измерения Class 1 — primary measurements	1-й класс (а) — попарные сравнения Class 1 (a) — pairwise comparisons	1-й класс (б) — точечные оценки на шкале Class 1 (b) — point marks on the scale
2-й класс — производные измерения Class 2 — derived measurements	2-й класс (а) — функции ценности Class 2 (a) — value functions	2-й класс (б) — частоты предпочтений Class 2 (b) — preference frequencies

ритмическом пространстве машинного обучения с возможностью демонстрации по преобразованию качественного описания риска в количественную меру, оказывающую влияние на достигаемую цель (рис. 5). Авторы научного исследования [9] предполагают в любой экспертной системе оценивать не только результаты функционирования отдельных элементов, входящих в ее содержание, но и учитывать их взаимодействующие связи, функциональность, самоорганизацию и развитие [10].

Для оценки организационных рисков (ОР) в СКБ на ВПО предприятиях из представленного множества различных экспертных методов было сформировано обоснование [11] целесообразности использования метода собственных векторов Саати. Его применение для оценки рисков заключается в формировании выборки с  $n$ -критериями, описываемыми относительными векторами их весов  $\lambda_i$ , причем:

$$\sum_{i=1}^n \lambda_i = 1. \quad (1)$$

Результаты попарного сравнения критериев описываются отношениями их весов, т.е. представимы в виде матрицы  $A$  [12], где  $A = \frac{\lambda_{ij}}{\lambda_j}$ ,  $ij \in \overline{1, n}$  — матрицы Саати, для которой справедливым будет следующее равенство:

$$A\bar{\lambda} = n\bar{\lambda}, \text{ или } (A - nI)\bar{\lambda} = 0, \quad (2)$$

где  $I$  — единичная матрица, а  $\bar{\lambda}$  — вектор весов.

Поскольку ранг матрицы равен 1, то  $n$  единственное собственное число этой матрицы (2) имеет ненулевое решение, которое обладает свойством:

$$\sum_{i=1}^n \lambda_i = 1.$$

Это решение и есть искомый вектор относительных весов критериев — вектор Саати [13], а метод разработал известный американский ученый Т. Саати, которому дано название — метод анализа иерархий (МАИ).

При оценке рисков в СКБ на ВПО предприятиях существенным моментом в процессе выработки и принятия решения ЛППР является формирование совокупности важных критериев и выявление отношений между ними [13].

В основном с помощью методов, используемых для преобразования качественной информации в количественный вид, например метода мозгового штурма (ММШ) [14], метода экспертного опроса (МЭО) [15] или других подобных методов [16, 17], решаются задачи на основе бинарных соотношений с предпочтением одного сравниваемого объекта оценки с качественным описанием по отношению к другому. Такая приоритетная зависимость может

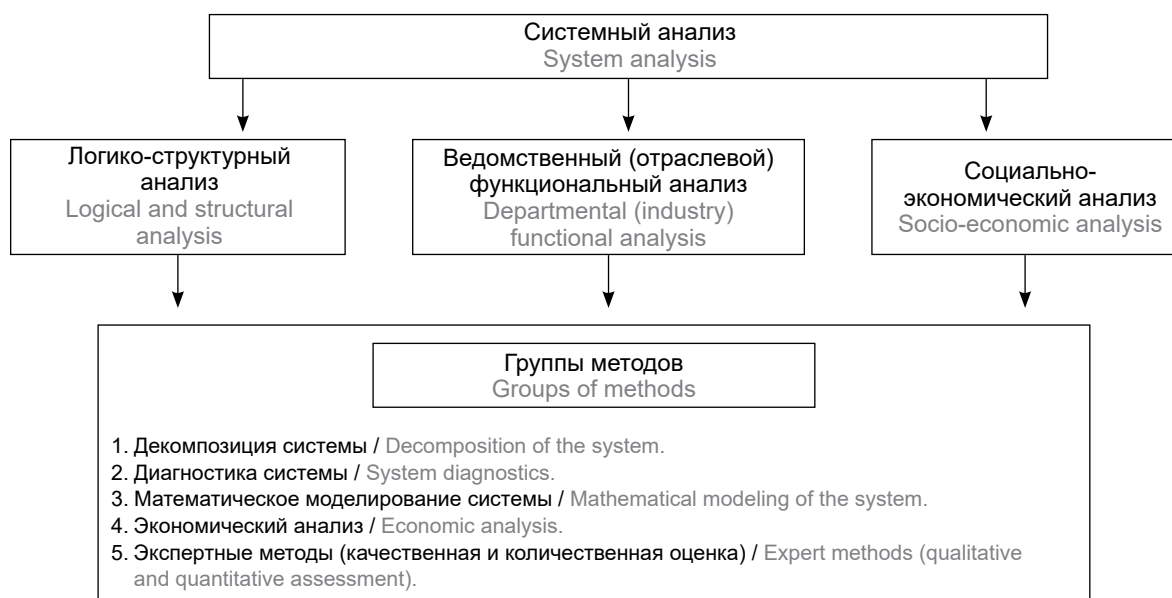
**Рис. 4.** Основные методы в структуре системного анализа

Fig. 4. The main methods in the structure of system analysis





Рис. 5. Возможности при использовании экспертов для оценки состояния СКБ на предприятиях

Fig. 5. The possibilities of using experts to assess the state of ISS in enterprises

быть представлена субъективным экспертным сообщением при выражении мнения в принятом решении на основе равной важности; незначительного, существенного, значительного и абсолютного превосходства, с использованием шкалы соотношений. А сам новый результат, который получен на основе бинарного сравнения, представляет собой общий результат, опирающийся на субъективное предпочтение каждого эксперта. Экспертам в самом начале нецелесообразно задавать множество ограничений и сужать рамки для использования всех условий для качественного проведения оценки [18]. Многие задачи по преобразованию качественной информации в количественную (экспертные задачи) решаются описанием результатов с множеством предпочтений одного сравниваемого объекта оценки по отношению к нескольким, с отображением связей в виде направленных векторов [19] (рис. 6).

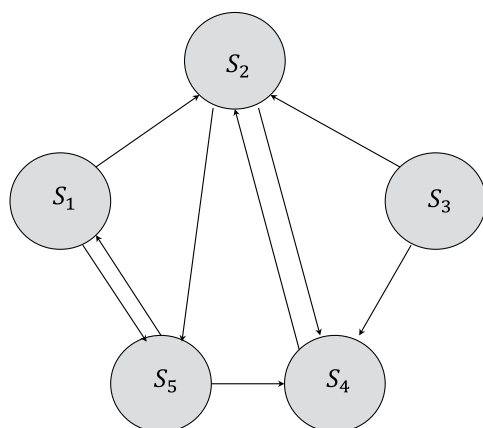


Рис. 6. Граф результата оценки  $n$ -объектов

Fig. 6. Graph of the  $n$ -object evaluation result

На рис. 6 в каждой из графовых вершин имеется связь с предпочтением одного или нескольких объектов оценки в отношении другого (других). Решить такую задачу непросто, так как появляются трудности при сравнении предпочтительности между вершинами графа ( $X_1, X_2, X_4, X_5$ ). Тут целесообразно строить матрицу [20]  $A = \|a_{ij}\|$ .

Если привести численные результаты *показателей критерия* с использованием переменных  $X$  для отчетов, принадлежащих группе, а  $y$  для причин возникновения ОС (аварий и пожаров) (табл. 2), то появляется возможность получить аргументы для каждого показателя критерия  $n$ .

Полные средние значения для двух переменных  $x_{\text{ПС}}, y_{\text{ПС}}$  будут найдены по формуле<sup>4</sup>:

$$x_{\text{ПС}} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^k x_i n(x_i); \quad y_{\text{ПС}} = \frac{1}{n} \sum_{j=1}^l y_j n(y_j).$$

Потребовалось использовать поправочный коэффициент ущерба  $q$  величина которого зависит от двух составляющих: потерь (погибших и пострадавших) (чел.) и потерь экономических (руб.):

$$U = F_U \{U_D, U_P, U_X, U_T, U_{\text{Пр}}\} = \sum \left[ F_{U_{(D, P, X, T, \text{Пр})}} (U_D, U_P, U_X, U_T, U_{\text{Пр}}) \right] \cdot q_{(0,1-1)}, \quad (3)$$

где  $U$  — общий ущерб от возникновения ОС (аварий и пожаров); ( $D, P, X, T, \text{Пр}$ ) — разные виды функционирования технологического процесса

<sup>4</sup> Справочник проектировщика промышленных, жилых и общественных зданий и сооружений (расчетно-теоретический). М., Стройиздат, 1972. 600 с.

**Таблица 2.** Матричное построение результатов показателей критерия с использованием переменных  
**Table 2.** Matrix construction of criterion indicator results using variables

$X$ $Y$	$x_1 \ x_2 \ \dots \ x_i \ \dots \ x_k$	$n$
$y_1$	$n_{11} \ n_{21} \ \dots \ n_{i1} \ \dots \ n_{k1}$	$n(y_1)$
$y_2$	$n_{12} \ n_{22} \ \dots \ n_{i2} \ \dots \ n_{k2}$	$n(y_2)$
$\dots$	$\dots \ \dots \ \dots \ \dots \ \dots \ \dots$	$\dots$
$y_j$	$n_{1j} \ n_{2j} \ \dots \ n_{ij} \ \dots \ n_{kj}$	$n(y_j)$
$\dots$	$\dots \ \dots \ \dots \ \dots \ \dots \ \dots$	$\dots$
$y_l$	$n_{1l} \ n_{2l} \ \dots \ n_{il} \ \dots \ n_{kl}$	$n(y_l)$
$y$	$n(x_1) \ n(x_2) \ \dots \ n(x_i) \ \dots \ n(x_k)$	$n$

производства на предприятиях НГК России (Д — добыча; П — переработка; Х — хранение; Т — транспортировка; Пр — прочие).

В случае, когда матрица  $A$  неразложима, то по теореме Перрона – Фробениуса [21] рассмотрение приводит к получению максимального собственного оценочного значения, представляющего число  $\lambda = \lim_{k \rightarrow \infty} \lambda(k)$  матрицы  $A$  собственным вектором:

$$P = \lim_{k \rightarrow \infty} P(k).$$

Продемонстрированное выше матричное отображение исходных данных, используемых для итеративной процедуры расчета, относится к методу расстановки приоритетов (МРП) [7]. Предложенный метод позволяет обрабатывать исходную нетранзитивную информацию, соответственно, он обладает возможностью расширения границ его применения для получения результатов, представленных в количественном виде. МРП усилен использованием вместе с ним вероятностного распределения Гаусса для преобразования результатов оценки из вербальной шкалы в шкалу порядка. Оригинальным является получение коэффициента негативного воздействия персонала, получаемого в количественном значении для персонала каждого ВД (ПрБ; ПБ; ОТ) и персонала ПСП.

### Решение научной задачи № 2

Для решения задачи № 2 требуется привлекать экспертов, имеющих практический опыт работы на ВПО предприятиях. Суть привлечения экспертной группы для получения групповой оценки заключается в сравнении независимых суждений с использованием границ интервалов. Рассматривались с одной стороны отчеты об авариях<sup>5</sup>, с другой стороны — НБ (ПрБ; ПБ; ОТ; ПСП), входящие в структуру СКБ. Осуществля-

лась выборка только тех отчетов, в которых представлена информация с возникшими авариями и пожарами на предприятиях. Экспертам потребовалось определить конкретное НБ из четверки (ПрБ; ПБ; ОТ; ПСП), в котором в результате недостаточных действий (недоработок) возник риск, проявленный в ОС (аварию и пожар). Потребовалось выделить из четверки (ПрБ; ПБ; ОТ; ПСП) то НБ, которое:

- имеет *непосредственное* отношение;
- имеет *опосредованное* отношение;
- имеет *косвенное* отношение.

Учитывая то, что экспертам будет выдаваться информация с качественным описанием (отчеты об авариях), потребовалось разработать шкалу отношений для получения результатов с количественными значениями (табл. 3) [22].

Расчетное значение для определения коэффициента воздействия —  $k_b$  (ПрБ; ПБ; ОТ; ПСП) представлено уравнением:

$$k_b \{ \text{ПрБ; ПБ; ОТ; ПСП} \} = 1 - \sum_1^3 k_n \{ \text{ПрБ; ПБ; ОТ; ПСП} \},$$

где  $k_n$  — величина в виде коэффициента недостаточных действий (недоработок) в НБ (ПрБ; ПБ; ОТ; ПСП), имеющая (*непосредственное, опосредованное или косвенное*) отношение к возникновению ОР.

Потребовалось рассматривать общий показатель работы НБ (ПрБ; ПБ; ОТ; ПСП) за выбранный период —  $t$ , как правило месяц, год. Учитывались особенности возникновения ОС (аварий и пожаров), кото-

**Таблица 3.** Соотношение результатов оценок измерений из вербальной шкалы в шкалу порядка  
**Table 3.** The ratio of measurement evaluation results from the verbal scale to the scale of order

Вербальная шкала принадлежности НБ (ПрБ; ПБ; ОТ; ПСП) к возникновению ОС (авария и пожар) The verbal scale of belonging of the SD (IS; FS; LP; PSU) to the occurrence of the DE (accident and fire)	Шкала порядка на основе вероятностного распределения Гаусса при условии 100 % = 1 An order scale based on a Gaussian probability distribution, assuming 100 % = 1
Имеет непосредственное отношение Directly related	68,2 % = 0,682
Имеет опосредованное отношение Indirectly related	27,2 % = 0,272
Имеет косвенное отношение Indirectly related	4,6 % = 0,046

<sup>5</sup> Уроки, извлеченные из аварий. URL: <https://www.gosnadzor.ru/industrial/oil/lessons/> (дата обращения: 12.02.2025).

	A			A			A			A		
	0,94			0,93			0,95			0,95		
B		D		B	D		B	D		B	D	
0,84	2014	0,31		0,92	2015	0,30	0,83	2016	0,25	0,96	2017	0,22
	C			C			C			C		
	0,90			0,85			0,97			0,86		

	A			A			A		
	0,97			0,99			1,00		
B		D		B	D		B	D	
0,91	2018	0,14		0,90	2019	0,16	0,94	2020	0,06
	C			C			C		
	0,98			0,95			1,00		

	A			A		
	1,00			1,00		
B		D		B	D	
0,91	2021	0,09		0,93	2022	0,07
	C			C		
	1,00			1,00		

Рис. 7. Результаты обработки информации с решением экспертов

Fig. 7. Results of information processing with the decision of experts

рые привязывались к видам технологического процесса производства (Д — добыча; П — переработка; Х — хранение; Т — транспортировка; Пр — прочие).

Итоговое расчетное значение, представляющее собой результат работы персонала отдельных ВД (ПрБ; ПБ; ОТ) и персонала (ПСП), описывается в уравнении:

$$K_{\text{Вл}(\text{Д; Т; П; Х; Пр})\{\text{ПрБ; ПБ; ОТ; ПСП}\}} = \frac{\sum_{i=1}^n k_{\text{в}}}{n},$$

где  $n$  — пронумерованный крайний показатель, принадлежащий выборке.

Информация, рассматриваемая в отношении данных статистики аварий на предприятиях НГК России для вида технологического процесса производства Д, обработана с использованием результатов экспертных решений (рис. 7).

Важнейшим требованием, предъявляемым к новым результатам, полученным в виде данных оценки рисков нанесения ущерба от аварий и пожаров,

является их проверка на достоверность и чувствительность. Под *достоверностью* будем понимать степень соответствия данных тому, что есть на самом деле, с учетом наличия погрешностей (ошибок). Достоверность подтверждается корректностью использования в информационной модели (*экспертно-расчетной*) — функционала нормального распределения Гаусса. В информационной модели (*иерархической*) — разработанной пятиранговой, пропорционально-убывающей матрицы, в которой доказан показатель отношения согласованности экспертов, который равен 0,05. В информационной модели (*графовой*) обосновывается получение результатов апостериорной вероятности наступления событий, с учетом гипотезы исследования, построенной на основе априорной вероятности. Чувствительность обеспечивается использованием параметрических подходов с установлением среднего значения и его среднеквад-

Таблица 4. Математический аппарат, обосновывающий достоверность и чувствительность при обработке данных

Table 4. A mathematical apparatus that substantiates the reliability and sensitivity of data processing

Достоверность / Reliability	
Информационная модель (экспертно-расчетная) Information model (expert-calculated)	$\bar{x} - \sigma, \bar{x} + \sigma$ , для выборки, включающей $\approx 68,2$ %, т.е. с присвоением показателя для оцениваемого мероприятия $\approx 0,682$ $\bar{x} - \sigma, \bar{x} + \sigma$ , for a specimen of $\approx 68.2$ %, i.e., with an assignment of an indicator for the evaluated event of $\approx 0.682$ ; $(x - 2\sigma, x + 2\sigma)$ , для выборки, включающей $\approx 27,2$ %, т.е. с присвоением показателя для оцениваемого мероприятия $\approx 0,272$ $(x - 2\sigma, x + 2\sigma)$ , for a specimen of $\approx 27.2$ %, i.e., with an assignment of an indicator for the evaluated event of $\approx 0.272$ ; $(x - 3\sigma, x + 3\sigma)$ , для выборки, включающей $\approx 4,2$ %, т.е. с присвоением показателя для оцениваемого мероприятия $\approx 0,042$ $(x - 3\sigma, x + 3\sigma)$ , for a specimen of $\approx 4.2$ %, i.e., with an assignment of an indicator for the evaluated event of $\approx 0.042$

Достоверность / Reliability		
Информационная модель (иерархическая) Information model (hierarchical)	$A = \begin{matrix} A_1 \\ A_2 \\ \vdots \\ A_n \end{matrix} \begin{bmatrix} A_1 & A_2 & \dots & A_n \\ w_1/w_1 & w_1/w_2 & \dots & w_1/w_n \\ w_1/w_2 & w_2/w_2 & \dots & w_2/w_n \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ w_n/w_1 & w_n/w_2 & \dots & w_n/w_n \end{bmatrix} = n \begin{bmatrix} w_1 \\ w_2 \\ \vdots \\ w_n \end{bmatrix}$	$\begin{matrix} A_1 = 0,51; \\ A_2 = 0,26; \\ A_3 = 0,13; \\ A_4 = 0,06; \\ A_5 = 0,03 \end{matrix}$
Информационная модель (графовая) Information model (graph model)	$P(A B) = \frac{P(B A)P(A)}{P(B)},$ <p>где <math>P(A)</math> — априорная вероятность гипотезы / a priori probability of the hypothesis; <math>P(A B)</math> — априорная вероятность гипотезы <math>A</math> при наступлении события <math>B</math> (апостериорная) вероятность / a priori probability of hypothesis <math>A</math> at the occurrence of event <math>B</math> (a posteriori) probability; <math>P(B)</math> — вероятность наступления события <math>B</math> / probability of occurrence of event <math>B</math></p>	
Анализ чувствительности / Sensitivity analysis		
$\bar{x}_a = \frac{\sum_{S=1}^{S=n} x_S m_S}{\sum_{S=1}^{S=n} m_S}; \quad \sigma^2 = \frac{\sum_{S=1}^{S=n} (x_S - \bar{x}_a)^2 \cdot m_S}{\sum_{S=1}^{S=n} m_S},$		
<p>где <math>\bar{x}_a</math> — показатель среднего значения для выборки данных / an indicator of the average value for a specimen of data; <math>n</math> — перечень рисков по объекту выборки / list of risks for the specimen object; <math>x_S</math> — показатель риска в середине интервалов (<math>S</math>) интервального ряда / the risk indicator in the middle of the intervals (<math>S</math>) of the interval series; <math>m_S</math> — показатель вероятности проявления риска (частоты, повторяемости) совокупности признаков для интервального ряда / an indicator of the probability of risk manifestation (frequency, repeatability) of a set of signs for an interval series; <math>\sigma</math> — показатель дисперсии для выборки данных / the variance indicator for the data specimen</p>		

тичного отклонения в виде показателя дисперсии для выборки данных (табл. 4).

### Заключение

Создаваемая на ВПО предприятиях СКБ усиливается в своем предназначении и обретает ценность. Представлено новое научное направление, требующее детального изучения и развития. Цель статьи, состоящая в разработке методики оценки рисков в СКБ, предназначенной для предупреждения аварий и пожаров на ВПО предприятиях, достигнута.

Представлено решение НЗ № 1, в котором обосновано использование метода (МРП), который усилен функционалом вероятностного распределения Гаусса для преобразования результатов оценки из вербальной шкалы в шкалу порядка с представлением количественных данных. Представлено решение НЗ № 2, в котором про-

демонстрирована разработка методики оценки состояния СКБ, предназначенной для получения выходных данных с рисковыми значениями. Использование разработанной методики на практике позволит откорректировать ранжированный перечень невыполненных НПА и НД по уровню рисков, сформировать требуемый запас для их управления, а значит эффективно спланировать мероприятия на период развития СКБ. Продемонстрирован пример, позволяющий доказать адекватность использования методики для оценки состояния СКБ на ВПО предприятиях.

Решение задач, направленных на повышение состояния СКБ, позволяет решать проблему по снижению показателей ущербов здоровью и жизни персонала и третьим лицам (чел.), а также показателей экономических ущербов (млрд руб.) на ВПО предприятиях, что имеет важное социально-экономическое значение для России.



## СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Гвоздев Е.В. Обоснование по выбору экспертного метода для проведения оценки состояния системы комплексной безопасности на производственных предприятиях // Пожаровзрывобезопасность/Fire and Explosion Safety. 2024. Т. 33. № 3. С. 87–96. DOI: 10.22227/0869-7493.2024.33.03.87-96. EDN JTFBBF.
2. Гвоздев Е.В. Разработка модели оценки влияния персонала на состояние системы комплексной безопасности, созданной на производственных предприятиях // Безопасность труда в промышленности. 2024. № 2. С. 7–15. DOI: 10.24000/0409-2961-2024-2-7-15. EDN SJOLEO.
3. Ghosh S., Zaboli A., Hong J., Kwon J. An Integrated Approach of Threat Analysis for Autonomous Vehicles Perception System // IEEE Access. 2023. Vol. 11. Pp. 14752–14777. DOI: 10.1109/ACCESS.2023.3243906. EDN UPQVKP.
4. Angermeier D., Wester H., Beilke K., Hansch G., Eichler J. Security Risk Assessments: Modeling and Risk Level Propagation. ACM Transactions on Cyber-Physical Systems, 2023. No. 7 (1). DOI: 10.1145/3569458
5. Stroykov G.A., Babyr N.V., Ilin I.V., Marchenko R.S. System of comprehensive assessment of project risks in energy industry // International Journal of Engineering. 2021. No. 34 (7). DOI: 10.5829/IJE.2021.34.07A.22
6. Блюмберг В.А., Глуценко В.Ф. Какое решение лучше? Метод расстановки приоритетов. Л. : Лениздат, 1982. 160 с.
7. Hernández-Orozco S., Zenil H., Riedel J., Uccello A., Kiani N.A., Tegnér J. Algorithmic Probability-Guided Machine Learning on Non-Differentiable Spaces // Frontiers in Artificial Intelligence. 2021. No. 3. DOI: 10.3389/frai.2020.567356
8. Rekovets L., Kuzmenko L. Species as a system within a system // Novitates Theriologicae. 2021. No. 12 (12). Pp. 97–104. DOI: 10.53452/nt1218
9. Podolchak N., Tsygulyk N., Dziurakh Y. Building an effective personnel risks management system of the organization // Eastern-European Journal of Enterprise Technologies. 2022. Vol. 4. No. 13–118. Pp. 44–52. DOI: 10.15587/1729-4061.2022.262547. EDN AAOUFS.
10. Ramalho F.D., Silva I.S., Ekel P.Y., Martins C.A.P. da S., Bernardes P., Libório M.P. Multimethod to prioritize projects evaluated in different formats // MethodsX. 2021. Vol. 8. No. 4. P. 101371. DOI: 10.1016/j.mex.2021.101371
11. Matrosova E., Tikhomirova A., Matrosov N., Dmitriy K. Visualization of T. Saati Hierarchy Analysis Method // Advances in Intelligent Systems and Computing. 2021. DOI: 10.1007/978-3-030-65596-9\_32
12. Alamdari A.M., Jabarzadeh Y., Adams B., Samson D., Khanmohammadi S. An analytic network process model to prioritize supply chain risks in green residential megaprojects // Operations Management Research. 2022. No. 16 (9). Pp. 1–23. DOI: 10.1007/s12063-022-00288-2
13. Анохин А.М., Глотов В.А., Павельев В.В., Черкашин А.М. Методы определения коэффициентов важности критериев // Автоматика и телемеханика. 1997. № 8. С. 3–35.
14. Gvozdev E. Development of an integrated safety sistem for production facilities: the problem statement and the proposed solution // Reliability: Theory & Applications. 2024. Vol. 19. No. 1 (77). Pp. 474–487. DOI: 10.24412/1932-2321-2024-177-474-487. EDN HWMWCS.
15. Srikrishnan V., Lafferty D.C., Wong T.E., Lamontagne J.R., Quinn J.D., Sharma S. et al. Uncertainty Analysis in Multi-Sector Systems: Considerations for Risk Analysis, Projection, and Planning for Complex Systems // Earth's Future. 2022. Vol. 10. Issue 8. DOI: 10.1029/2021EF002644
16. Niazi M.A. Introduction to the modeling and analysis of complex systems : a review // Complex Adaptive Systems Modeling. 2016. No. 4 (1). DOI: 10.1186/s40294-016-0015-x
17. Bjerga T., Aven T., Zio E. Uncertainty treatment in risk analysis of complex systems: The cases of STAMP and FRAM // Reliability Engineering and System Safety. 2016. No. 156 (1). DOI: 10.1016/j.ress.2016.08.004
18. Гвоздев Е.В. Межсистемное взаимодействие и связи в системе комплексной безопасности, предназначенной для предупреждения аварий и пожаров на взрывопожароопасных предприятиях // Безопасность труда в промышленности. 2024. № 12. С. 40–46. DOI: 10.24000/0409-2961-2024-12-40-46. EDN DBGRSC.
19. Mbuli N., Mathonsi M., Seitshiro M., Pretorius J.H.C. Decomposition forecasting methods : a review of applications in power systems // Energy Reports. 2020. No. 6. Pp. 298–306. DOI: 10.1016/j.egyr.2020.11.238
20. Bapat R.B. A max version of the Perron-Frobenius theorem. Linear Algebra and Its Applications. 1998. No. 275–276. Pp. 3–18. DOI: 10.1016/S0024-3795(97)10057-X
21. Dvulit P., Savchuk S., Sosonka I. Accuracy estimation of site coordinates derived from GNSS-observations by non-classical error theory of measurements // Geodesy and Geodynamics. 2021. No. 12 (3). DOI: 10.1016/j.geog.2021.07.005
22. Gvozdev E.V. Assessment of the state of integrated security system at the enterprise using the priority setting method // Real Estate: Economics, Management. 2024. No. 2. Pp. 33–36. EDN HEAOJB.

## REFERENCES

1. Gvozdev E.V. Justification for choosing an expert method for assessing the state of the integrated safety system at industrial enterprises. *Pozharovzryvobezopasnost'/Fire and explosion safety*. 2024; 33(3):87-96. DOI: 10.22227/0869-7493.2024.33.03.87-96. EDN JTFBBF. (rus).
2. Gvozdev E.V. Development of a model for assessing the impact of personnel on the state of the integrated safety system created at industrial enterprises. *Occupational safety in industry*. 2024; 2:7-15. DOI: 10.24000/0409-2961-2024-2-7-15. EDN SJOLEO. (rus).

3. Ghosh S., Zaboli A., Hong J., Kwon J. An Integrated Approach of Threat Analysis for Autonomous Vehicles Perception System. *IEEE Access*. 2023; 11:14752-14777. DOI: 10.1109/ACCESS.2023.3243906. EDN UPQVKP.
4. Angermeier D., Wester H., Beilke K., Hansch G., Eichler J. Security Risk Assessments: Modeling and Risk Level Propagation. *ACM Transactions on Cyber-Physical Systems*. 2023; 7(1). DOI: 10.1145/3569458
5. Stroykov G.A., Babyr N.V., Ilin I.V., Marchenko R.S. System of comprehensive assessment of project risks in energy industry. *International Journal of Engineering*. 2021; 34(7). DOI: 10.5829/IJE.2021.34.07A.22
6. Blumberg V.A., Glushchenko V.F. *Which solution is better? The method of prioritization*. Leningrad, Lenizdat, 1982. 160 p. (rus).
7. Hernández-Orozco S., Zenil H., Riedel J., Uccello A., Kiani N.A., Tegnér J. Algorithmic Probability-Guided Machine Learning on Non-Differentiable Spaces. *Frontiers in Artificial Intelligence*. 2021; 3. DOI: 10.3389/frai.2020.567356
8. Rekovets L., Kuzmenko L. Species as a system within a system. *Novitates Theriologicae*. 2021; 12(12):97-104. DOI: 10.53452/nt1218 (ukr).
9. Podolchak N., Tsygulyk N., Dziurakh Y. Building an effective personnel risks management system of the organization. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*. 2022; 4(13-118):44-52. DOI: 10.15587/1729-4061.2022.262547. EDN AAOUFS.
10. Ramalho F.D., Silva I.S., Ekel P.Y., Martins C.A.P. da S., Bernardes P., Libório M.P. Multimethod to prioritize projects evaluated in different formats. *MethodsX*. 2021; 8(4):101371. DOI: 10.1016/j.mex.2021.101371
11. Matrosova E., Tikhomirova A., Matrosov N., Dmitriy K. Visualization of T. Saati Hierarchy Analysis Method. *Advances in Intelligent Systems and Computing*. 2021. DOI: 10.1007/978-3-030-65596-9\_32
12. Alamdari A.M., Jabarzadeh Y., Adams B., Samson D., Khanmohammadi S. An analytic network process model to prioritize supply chain risks in green residential megaprojects. *Operations Management Research*. 2022; 16(9):1-23. DOI: 10.1007/s12063-022-00288-2
13. Anokhin A.M., Glotov V.A., Pavelyev V.V., Cherkashin A.M. Methods for determining coefficients of criteria importance. *Automation and Telemekhanics*. 1997; 8:3-35. (rus).
14. Gvozdev E. Development of an integrated safety sistem for production facilities: the problem statement and the proposed solution. *Reliability: Theory & Applications*. 2024; 19:1(77):474-487. DOI: 10.24412/1932-2321-2024-177-474-487. EDN HWMWCS.
15. Srikrishnan V., Lafferty D.C., Wong T.E., Lamontagne J.R., Quinn J.D., Sharma S. et al. Uncertainty Analysis in Multi-Sector Systems: Considerations for Risk Analysis, Projection, and Planning for Complex Systems. *Earth's Future*. 2022; 10(8). DOI: 10.1029/2021EF002644
16. Niazi M.A. Introduction to the modeling and analysis of complex systems : a review. *Complex Adaptive Systems Modeling*. 2016; 4(1). DOI: 10.1186/s40294-016-0015-x
17. Bjerga T., Aven T., Zio E. Uncertainty treatment in risk analysis of complex systems: The cases of STAMP and FRAM. *Reliability Engineering and System Safety*. 2016; 156(1). DOI: 10.1016/j.ress.2016.08.004
18. Gvozdev E.V. Intersystem interaction and communications in an integrated safety system designed to prevent accidents and fires at explosive and fire-hazardous enterprises. *Occupational safety in industry*. 2024; 12:40-46. DOI: 10.24000/0409-2961-2024-12-40-46. EDN DBGRSC. (rus).
19. Mbuli N., Mathonsi M., Seitshiro M., Pretorius J.H.C. Decomposition forecasting methods : a review of applications in power systems. *Energy Reports*. 2020; 6:298-306. DOI: 10.1016/j.egyr.2020.11.238
20. Bapat R.B. A max version of the Perron-Frobenius theorem. *Linear Algebra and Its Applications*. 1998; 275-276:3-18. DOI: 10.1016/S0024-3795(97)10057-X
21. Dvulit P., Savchuk S., Sosonka I. Accuracy estimation of site coordinates derived from GNSS-observations by non-classical error theory of measurements. *Geodesy and Geodynamics*. 2021; 12(3). DOI: 10.1016/j.geog.2021.07.005
22. Gvozdev E.V. Assessment of the state of integrated security system at the enterprise using the priority setting method. *Real Estate: Economics, Management*. 2024; 2:33-36. EDN HEAOJB.

Поступила 07.12.2024, после доработки 14.02.2025;

принята к публикации 18.02.2025

Received December 07, 2024; Received in revised form February 14, 2025;

Accepted February 18, 2025

## Информация об авторе

**ГВОЗДЕВ Евгений Владимирович**, к.т.н., доцент кафедры механизации, автоматизации и роботизации строительства, Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет, Россия, 129337, г. Москва, Ярославское шоссе, 26; РИНЦ ID: 296055; ORCID: 0000-0002-3679-1065; e-mail: evgvozdev@mail.ru

## Information about the author

**Yevgeniy V. GVOZDEV**, Cand. Sci. (Eng.), Associate Professor of the Department of Mechanization, Automation and Robotization of Construction, Moscow State University of Civil Engineering (National Research University), Yaroslavl'skoe Shosse, 26, Moscow, 129337, Russian Federation; ID RSCI: 296055; ORCID: 0000-0002-3679-1065; e-mail: evgvozdev@mail.ru

## Использование видеоаналитики для раннего обнаружения возгорания

Максим Иванович Готов ✉, Светлана Сергеевна Кропотова,  
Павел Александрович Стрижак

Национальный исследовательский Томский политехнический университет, г. Томск, Россия

### АННОТАЦИЯ

**Введение.** Тревожные тенденции изменения статистики возникновения пожаров в зданиях и помещениях в последние годы с масштабными последствиями требуют поиска и разработки новых методов и подходов в области раннего обнаружения возгораний. Перспективным подходом к малоинерционной идентификации возгораний принято считать использование интеллектуальных и основанных на визуальной оценке пожарной опасности в помещении систем на базе различных типов видеокамер. В отличие от традиционных точечных пожарных извещателей данный метод не ограничен объемами помещения и позволяет обнаружить возгорание даже на больших открытых пространствах и непрогнозируемом перемещении фронта пламени.

**Целью исследования** является обоснование возможности достоверной идентификации очага возгорания в помещении на ранней стадии с использованием видеосъемки. Основной задачей является разработка алгоритма для обучения модуля нейронной сети, позволяющего с высокой точностью определить координаты местоположения очага возгорания в помещении на ранней стадии с использованием видеосъемки.

**Материалы и методы.** Экспериментальные исследования проведены с использованием макета помещения размерами  $3 \times 3 \times 2,3$  м с установленными в нем системой газоанализа, пожарными извещателями, средствами видеорегистрации, а также системой управления и мониторинга для сбора и записи информации.

**Результаты и их обсуждение.** В результате проведенных исследований предложен подход к применению видеоаналитики для идентификации очага возгораний на ранней стадии.

**Заключение.** На основе экспериментальных исследований выбран оптимальный размер предобученной модели нейронной сети для поставленной задачи, а также обоснована целесообразность использования камеры видеонаблюдения для малоинерционной идентификации возгораний в помещениях.

**Ключевые слова:** видеомониторинг; нейросетевые алгоритмы; пожарная безопасность; мониторинг инцидентов; пожарные извещатели

**Благодарности.** Исследование выполнено при поддержке проекта Национального исследовательского Томского политехнического университета ПИШ-НИР-2024-014.

**Для цитирования:** Готов М.И., Кропотова С.С., Стрижак П.А. Использование видеоаналитики для раннего обнаружения возгорания // Пожаровзрывобезопасность/Fire and Explosion Safety. 2025. Т. 34. № 1. С. 70–78. DOI: 10.22227/0869-7493.2025.34.01.70-78

✉ Готов Максим Иванович, e-mail: mig13@tpu.ru

## Using video analytics for early fire detection

Maksim I. Glotov ✉, Svetlana S. Kropotova, Pavel A. Strizhak

National Research Tomsk Polytechnic University, Tomsk, Russian Federation

### ABSTRACT

**Introduction.** Alarming trends in the statistics of fires in buildings and premises in recent years with large-scale consequences require the search and development of new methods and approaches in the field of early fire detection. A promising approach to low-inertia identification of fires is considered to be the use of intelligent systems based on visual assessment of fire hazard in the premises, based on various types of video cameras. Unlike traditional point fire detectors, this method is not limited by the volume of the room and allows detecting fires even in large open spaces and unpredictable movement of the flame front.

**The aim of the research** is to substantiate the feasibility of reliably identifying the fire source in a room at an early stage using video recording. The main task is to develop an algorithm for training a neural network module that allows for the accurate determination of the coordinates of the fire source location in a room at an early stage using video recording.

**Materials and methods.** Experimental studies were carried out using a  $3 \times 3 \times 2.3$  m room model with a gas analysis system, fire alarms, video recording equipment, and a control and monitoring system for collecting and recording information installed in it.

**Results and Discussion.** As a result of the conducted research, an approach to the use of video analytics for identifying the source of fires at an early stage was proposed.

**Conclusions.** Based on experimental studies, the optimal size of the pre-trained neural network model for the task was selected, and the feasibility of using a video surveillance camera for low-inertia identification of fires in premises was substantiated.

**Keywords:** video monitoring; neural network algorithms; fire safety; incident monitoring; fire detectors

**Acknowledgments.** The study was carried out with the support of the project of the National Research Tomsk Polytechnic University PISh-NIR-2024-014.

**For citation:** Glotov M.I., Kropotova S.S., Strizhak P.A. Using video analytics for early fire detection. *Pozharovzryvobezopasnost/Fire and Explosion Safety*. 2025; 34(1):70-78. DOI: 10.22227/0869-7493.2025.34.01.70-78 (rus).

✉ Maksim Ivanovich Glotov, e-mail: mig13@tpu.ru

## Введение

Вследствие довольно масштабных последствий возгораний в жилых зданиях и производственных помещениях разработка и создание новых эффективных подходов в области раннего обнаружения возгораний является актуальной научно-технической задачей [1–3]. Наиболее распространенным в области пожарной безопасности принято считать использование пожарных извещателей разных типов. Точечные датчики срабатывают при изменении температуры в контролируемом помещении, появлении пламени, дыма, достижении предельно допустимой концентрации (ПДК) горючих газов [4]. Основным недостатком перечисленных технических средств является инерционность их срабатывания [5], а также то, что их чувствительные элементы регистрируют, как правило, лишь очевидные признаки пожара, появляющиеся при уже активном и неконтролируемом распространении возгорания. Многие производственные процессы, сопровождающиеся повышением температуры в помещении или образованием мелкодисперсной пыли, приводят к ложным срабатываниям таких датчиков. Для снижения вероятности ложных срабатываний их необходимо размещать в непосредственной близости от потенциально горючих материалов, что не всегда возможно. Однако даже при своевременном срабатывании пожарные извещатели не позволяют получить дополнительную информацию о местоположении очага возгорания, его размерах, типе вовлеченного в горение материала и другом. Более инерционным является использование мультикритериальных [6] и газовых пожарных извещателей, например сенсора оксида углерода [7–9]. Результаты исследований [10, 11] обосновывают целесообразность их использования при сверхраннем обнаружении возгорания. Однако данный тип пожарных извещателей эффективен в основном при обнаружении долго тлеющих материалов, термическое разложение которых

сопровождается выделением большого объема газообразных веществ. Дальнейшее развитие технологий идентификации возгораний способствовало внедрению интеллектуальных и основанных на визуальной оценке пожарной опасности в помещении систем [12], и, как следствие, распространению использования в качестве технических средств обнаружения возгораний различных типов видеокамер [13]. В отличие от традиционных точечных пожарных извещателей [14], которые ограничены объемами помещения и малоэффективны в полуоткрытых помещениях, например складах и автостоянках, видеорегистрация [15, 16] позволяет обнаружить возгорание даже на больших открытых пространствах с минимальной задержкой по времени [17]. Своевременное обнаружение возгорания основано на обработке потока видеок кадров и определении таких пространственно-временных характеристик [18], как неравномерность контура в отдельных кадрах и временные изменения между последовательными кадрами. На полученных с использованием камеры видеонаблюдения кадрах зачастую присутствуют объекты, визуально напоминающие очаг возгорания: световые приборы или солнечные лучи, пламя от свечей, зажигалки и другое. Актуальным является обучение нейронных сетей по потоку видеок кадров в условиях ложных срабатываний для адаптации алгоритмов обнаружения возгораний в широкой группе жилых и производственных помещений [19]. В данном направлении можно выделить работу [20] с результатами изучения возможности обнаружения очагов возгорания на технологических объектах с использованием сверточной нейронной сети, способной обнаруживать пламя и дым на изображении с камер видеонаблюдения с вероятностью 42 %. В настоящем исследовании, в отличие от работы [20], по данным экспериментальных исследований предложен подход по определению с использованием камеры видеонаблюдения и обученной нейронной сети места возгорания, типа материала, а также



координат очага возгорания с точностью до 92 %. Целью исследования является разработка подхода к идентификации очага возгорания в помещении на ранней стадии с использованием камеры видеонаблюдения и разработанной нейронной сети. Основная задача — разработка алгоритма обучения модуля нейронной сети, позволяющего с высокой точностью определить координаты места возгорания.

### Материалы и методы

Для идентификации очага возгорания на ранней стадии с использованием камеры видеонаблюдения использована сверточная нейронная сеть, основным этапом обучения которой является подготовка обучающей выборки. При подготовке данных для обучения в качестве объекта идентификации выбран очаг пожара площадью от 100 до 400 см<sup>2</sup>. Очаг пожара такого размера соответствует начальной стадии возгорания. Обучающие изображения получены в ходе предварительных экспериментов в области разработки малоинерционных систем обнаружения и идентификации пожароопасных ситуаций на примере очагов класса А [7], а также получены из открытых источников. Основным критерием выбора изображения в обучающую выборку являлось наличие очага возгорания соответствующих размеров. Разрешение изображений, на которых обучалась модель, составляло 1280 × 720 пикселей. В обучающую выборку отбирались изображения с очагами возгорания с разной интенсивностью горения (рис. 1), находящимися как внутри закрытого помещения, так и снаружи.

При разработке модели нейронной сети для идентификации очага возгорания выбрана модель сегментации экземпляров. Данная модель предоставляет контуры или маски идентифицированных объектов и может быть использована для проработки дальнейшей логики системы малоинерцион-

ного обнаружения пожаров, например расчета площади очага. Для реализации модели сегментации объекты в обучающей выборке размечались в соответствии с их видимыми границами. Аннотирование (разметка) изображений проводилось с использованием программного обеспечения Anylabeling с открытым исходным кодом. Данный инструмент ускоряет разметку большого объема данных путем использования моделей искусственного интеллекта, таких как Segment Anything и YOLO, для автоматического аннотирования изображений. К данным для обучения также применены методы аугментации (различные трансформации изображений и их разметки для увеличения разнообразия обучающего набора), такие как отражения по горизонтали и поворот на  $\pm 15^\circ$ . Аннотированные изображения разделены в соотношении 80, 20 и 20 % для обучения, валидации и тестирования соответственно. В качестве предобученной модели нейронной сети выбрана актуальная в линейке продуктов компании Ultralytics модель YOLOv8. Данная модель зарекомендовала себя как надежный инструмент для достоверной идентификации объектов в реальном времени и содержит от 3,2 до 66 млн обучаемых параметров в зависимости от выбранного размера модели.

Для повышения помехоустойчивости модели, помимо целевого класса «огонь» (название класса в модели: fire), введен класс объектов-помех, визуально напоминающих признаки возгорания (название класса в модели: firenoise), но таковыми не являющиеся. В качестве помех рассматривались следующие инциденты: отражения огня, блики на линзе видеокамеры, засвеченные солнцем области, источники искусственного света, например индикаторные лампочки приборов. По окончании обучения фиксировались стандартные параметры качества обучения модели машинного зрения, такие как mAP<sub>50</sub>, mAP<sub>50-100</sub>, Precision. Средняя точность (mAP) — метрика для оценки производительности моделей



Рис. 1. Очаг возгорания на разных стадиях горения  
Fig. 1. Fire source at different stages of combustion

Таблица 1. Оборудование, использовавшееся при обучении и тестировании модели

Наименование Name	Оборудование Equipment
Операционная система Operating system	Windows 10
CPU	13th Gen Intel(R) Core (TM) i7-13700F
GPU	NVIDIA GeForce RTX 4060

обнаружения объектов.  $mAP_{50}$  рассчитывается при пороге IoU, равном 0,5. Это означает, что предсказание модели считается верным, если предсказанное ограничивающее поле не менее чем на 50 % совпадает с истинным. Показатель  $mAP_{50-100}$  представляет метрику, которая учитывает среднюю точность при различных порогах IoU от 0,5 до 1,0. Это позволяет получить более полное представление о производительности модели при различных требованиях к точности определения границ идентифицируемых объектов (от 50 до 100 %). Точность (Precision) показывает, сколько из всех положительных прогнозов модели являются верными. В контексте обнаружения объектов данная метрика отражает долю правильных предсказаний среди всех сделанных положительных прогнозов.

Обучение модели и ее тестирование проводилось на ЭВМ с характеристиками, представленными в табл. 1.

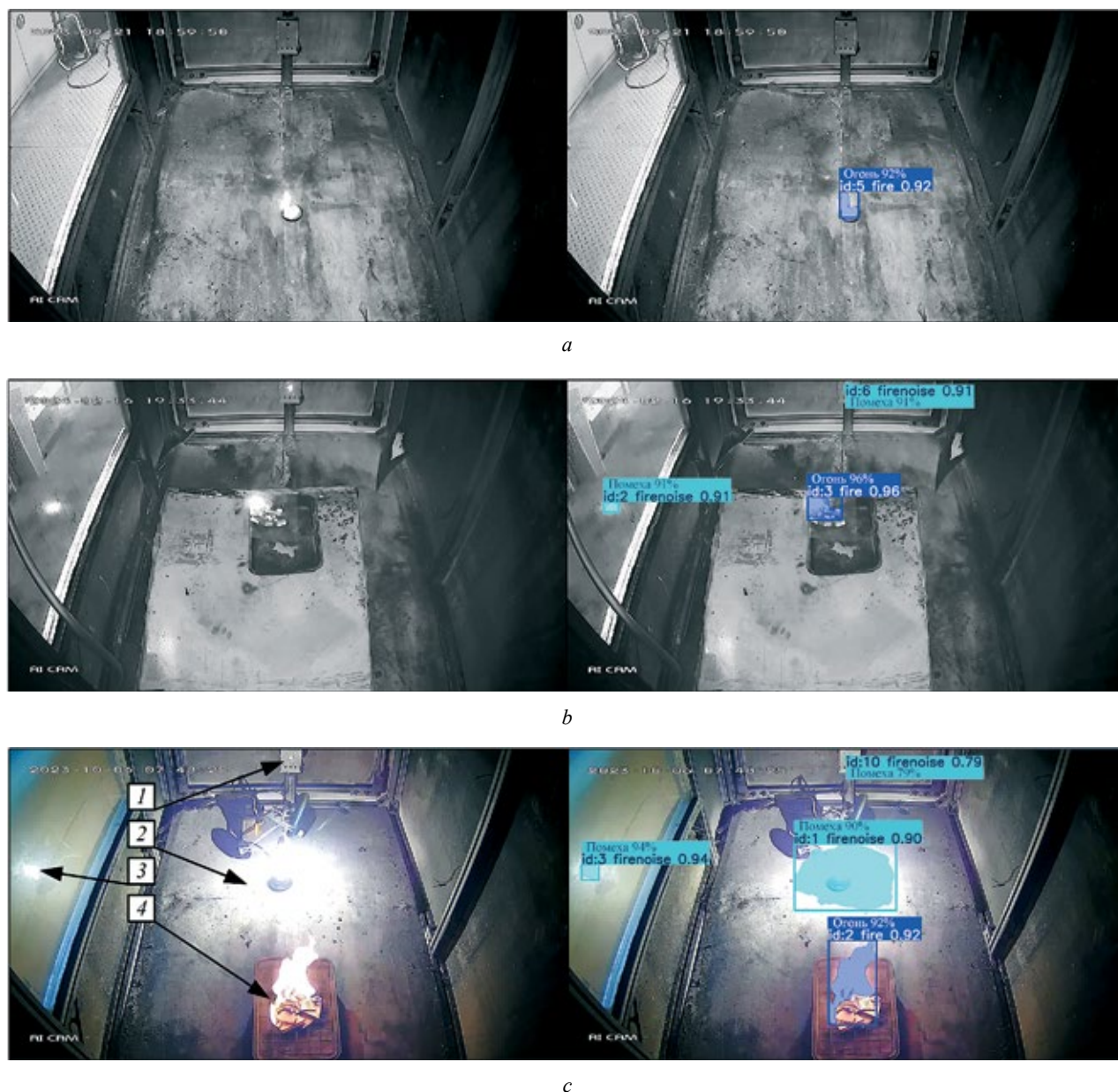
Таблица 2. Выбор размера предобученной модели YOLOv8  
Table 2. Selecting the size of the pre-trained YOLOv8 model

Размер предобученной модели Pre-trained model size	Количество обучаемых параметров, млн Number of trainable parameters, million	$mAP_{50}$	$mAP_{50-100}$	Точность Precision	Скорость обработки изображения, мс Image processing speed, ms
YOLOv8 Nano	3,2	0,98705	0,73177	0,84	Не более 40 No more than 40
YOLOv8 Small	7,2	0,97357	0,71299	0,85	Не более 50 No more than 50
YOLOv8 Medium	12,0	0,9883	0,73408	0,89	Не более 100 No more than 100
YOLOv8 Large	25,0	0,97011	0,71011	0,91	Не более 140 No more than 140
YOLOv8 XLarge	53,9	0,9702	0,69738	0,92	Не более 220 No more than 140

Результаты и их обсуждение

Используя полученные данные, проведено обучение модели нейронной сети для идентификации начальной стадии возникновения пожара на основе предобученной модели YOLOv8 различных размеров, отличающихся количеством обучаемых параметров. Увеличение размера модели ведет к увеличению точности идентификации, но приводит к замедлению обработки изображений, что критически важно для систем, работающих в режиме реального времени. Поэтому проведено сравнение результатов обучения по основным метрикам, описанным выше, для выбора размера предобученной модели YOLOv8, обеспечивающего одновременно и точность, и быстродействие при идентификации пламени. Параметры качества модели, полученные при обучении на моделях различного размера, приведены в табл. 2.

Исходя из высоких значений метрики  $mAP$  ( $> 0,7$ ), все модели являются работоспособными. Учитывая, что в современных системах пожарной охраны, работающих в режиме реального времени, период опроса оборудования составляет от одной до пяти секунд, основным параметром выбора размера предобученной модели является точность на тестовой выборке. YOLOv8 XLarge имеет прирост точности в 1 % по сравнению с YOLOv8 Large, однако скорость обработки при этом снижается в 1,5 раза. При обучении на основании моделей малого размера Nano и Small наблюдались частая потеря и повторная идентификация объекта, что может быть критически важным недостатком при необходимости наблюдения за несколькими



**Рис. 2.** Демонстрация работы модели идентификации огня (fire) с учетом помех (firenoise): *a* — малого пламени; *b* — пламени различной интенсивности; *c* — пламени в сложной помеховой обстановке: 1 — индикаторная лампа прибора; 2 — искусственное освещение; 3 — отражения; 4 — очаг возгорания

**Fig. 2.** Demonstration of the operation of the fire identification model taking into account interference (firenoise): *a* — small flame; *b* — flame of varying intensity; *c* — flame in a complex interference environment: 1 — indicator lamp of the device; 2 — artificial lighting; 3 — reflections; 4 — source of fire

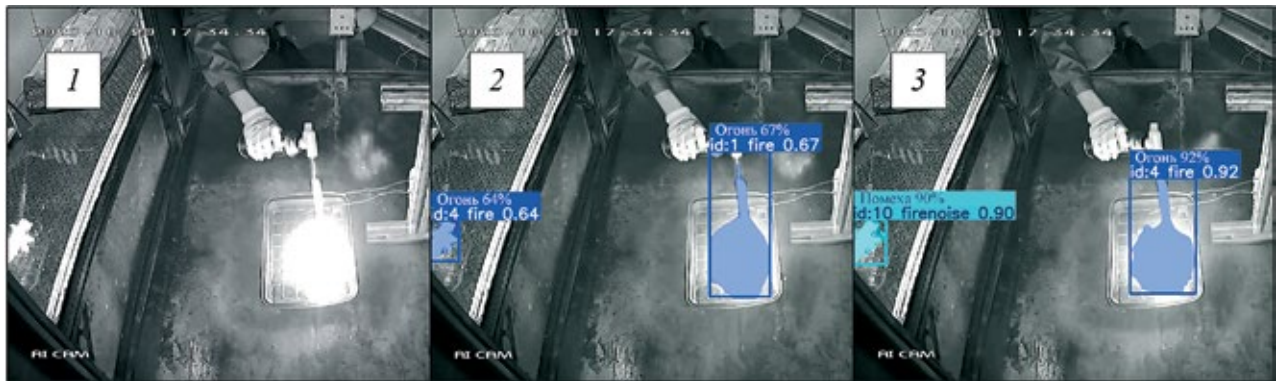
объектами в течение заданного времени. Исходя из этого, для идентификации очага возгорания в режиме реального времени наиболее подходящей является модель YOLOv8 Large с точностью 0,91. Результаты работы обученной модели с сегментацией объектов представлены на рис. 2. Результат введения в обучающую выборку класса объектов-помех (firenoise), похожих на пламя, но не являющихся таковым, представлен на рис. 3. Показано, что модель, не обученная на распознавание объектов, схожих с очагом возгорания, ошибочно интерпретирует его как пламя. В то же время

модель, обученная для выполнения данной задачи, демонстрирует точность на 20 % выше.

### Возможности системы

По сравнению с существующим аналогом системы идентификации, описание которого представлено в работе [20], разработанная модель позволяет не только идентифицировать очаг возгорания, но и определять его положение и размеры. Полученная модель идентифицирует пламя с большей точностью, в том числе вследствие решения задач помехоустой-





**Рис. 3.** Результат применения модели идентификации пламени при наличии помех: 1 — обрабатываемое изображение; 2 — модель при разметке только пламени (fire); 3 — модель при разметке класса пламени (fire) и класса помех (firenoise)  
**Fig. 3.** Result of applying the flame identification model in the presence of noise: 1 — processed image; 2 — model for marking only flame (fire); 3 — model for marking the flame class (fire) and noise class (firenoise)

чивости. Помимо этого, обученная модель идентификации пламени работает с поддержкой сегментации. При обработке изображения модель в том числе возвращает маску сегментации. При рассмотрении только объекта «пламя» (fire) данная маска будет являться бинарной:

$$Fire^{bin} = \begin{bmatrix} px_{00} & px_{10} & \dots & px_{m0} \\ px_{01} & px_{11} & \dots & px_{m1} \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ px_{0n} & px_{1n} & \dots & px_{mn} \end{bmatrix},$$

где значение  $px$  принимает значение 0 или 1 в зависимости от наличия объекта в этом пикселе;  $n \times m$  — разрешение изображения.

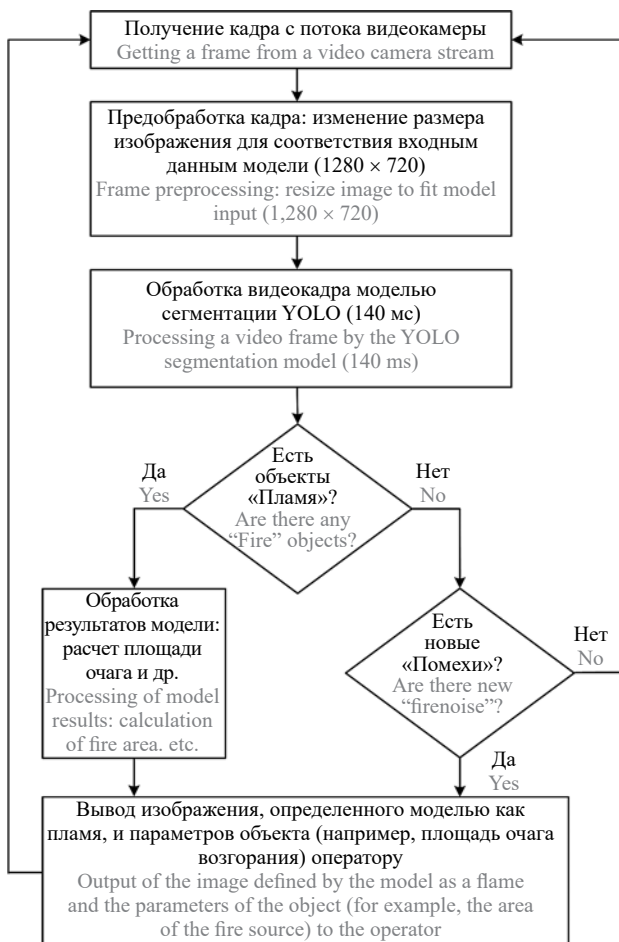
Такой формат удобен для обработки результатов модели. Например, для расчета площади очага необходимо поэлементно умножить бинарную матрицу объекта на матрицу, содержащую значения покрываемой реальной площади каждым пикселем ( $K^S$ , м/пкс):

$$S = \sum_{i=0}^{i=m} \left( \sum_{j=0}^{j=n} (px_{ij} \cdot K_{ij}^S) \right).$$

Таким образом, предложенная модель позволит оценить скорость распространения пожара, удаление очага возгорания от особо значимых зон, а следовательно, оценить приоритетность локализации и подавления возгорания. Полученную модель нейронной сети идентификации возгорания предлагается использовать в системах пожарной безопасности в соответствии с алгоритмом, изображенным на рис. 4.

### Заключение

1. Показано, что модель YOLOv8 размера Large с 25 млн обучающих параметров является наиболее подходящей для идентификации возгораний на начальном этапе. Точность идентификации составила 0,91, а скорость обработки одного кадра — 140 мс.
2. Обоснована целесообразность применения модели сегментации для идентификации очагов возгорания.
3. Рассмотрены вопросы увеличения помехоустойчивости модели путем введения в обу-



**Рис. 4.** Алгоритм применения модели идентификации очага возгорания в системе пожарной безопасности с использованием видеокamеры  
**Fig. 4.** Algorithm for applying the fire source identification model in the fire safety system using a video camera

чающий набор данных информации об объектах, визуально напоминающих возгорание и приводящих к ложным срабатываниям (отражения, блики, солнечный и искусственный свет и другое).

4. Разработан подход к обучению модели нейронной сети, которая с высокой точностью идентифицирует очаг возгорания на ранней стадии при обработке информации с камеры видеонаблюдения.

### СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Festag S. The statistical effectiveness of fire protection measures: learning from real fires in Germany // *Fire Technology*. 2021. Vol. 57. Pp. 1589–1609. DOI: 10.1007/s10694-020-01073-y
2. Sheng D., Deng J., Zhang W., Cai J., Zhao W., Xiang J. A statistical image feature-based deep belief network for fire detection // *Complexity*. 2021. No. (1). Pp. 1–12. DOI: 10.1155/2021/5554316
3. Ma C., Van Coile R., Gernay T. Fire protection costs in composite buildings for cost-benefit analysis of fire designs // *Journal of Constructional Steel Research*. 2024. Vol. 215. No. 108517. DOI: 10.1016/j.jcsr.2024.108517
4. Nan C., Xianmeng M., Wenhui D. Experimental study on the testing environment improvement of fire smoke detectors // *Procedia Engineering*. 2012. Vol. 45. Pp. 610–616. DOI: 10.1016/j.proeng.2012.08.211
5. Калмыков С.П., Есин В.М. Время обнаружения очага пожара // *Пожаровзрывобезопасность/Fire and Explosion Safety*. 2017. Vol. 26 (11). Pp. 52–63. DOI: 10.1016/j.proeng.2012.08.211
6. Членов А.Н., Буцынская Т.А., Журавлев С.Ю., Николаев В.А. Об эффективности функционирования мультикритериального пожарного извещателя // *Пожаровзрывобезопасность/Fire and Explosion Safety*. 2016. Vol. 25 (12). Pp. 55–60. DOI: 10.18322/PVB.2016.25.12.55-60. EDN XWVMGZ.
7. Kuznetsov G.V., Volkov R.S., Sviridenko A.S., Strizhak P.A. Fire detection and suppression in rooms with different geometries // *Journal of Building Engineering*. 2024. Vol. 90. No. 109427. DOI: 10.1016/j.job.2024.109427
8. Kuznetsov G.V., Zhdanova A.O., Volkov R.S., Sviridenko A.S., Strizhak P.A. Smoke deposition and extraction in compartment fires with different ignition sources // *Process Safety and Environmental Protection*. 2024. Vol. 187. Pp. 581–592. DOI: 10.1016/j.psep.2024.05.010
9. Артамонов В.С., Поляков А.С., Иванов А.Н. Сверхраннее и раннее обнаружение загораний: понятия, границы применения и единство // *Пожаровзрывобезопасность/Fire and Explosion Safety*. 2016. Vol. 25 (9). Pp. 78–83. DOI: 10.18322/PVB.2016.25.09.78-83
10. Song Z., Huang X., Jiang J., Pan X. A laboratory approach to CO<sub>2</sub> and CO emission factors from underground coal fires // *International Journal of Coal Geology*. 2020. Vol. 219. No. 103382. DOI: 10.1016/j.coal.2019.103382
11. Li Y., Yu L., Zheng C., Ma Z., Yang S., Song F. et al. Development and field deployment of a mid-infrared CO and CO<sub>2</sub> dual-gas sensor system for early fire detection and location // *Spectrochimica Acta Part A: Molecular and Biomolecular Spectroscopy*. 2022. Vol. 270. No. 120834. DOI: 10.1016/j.saa.2021.120834
12. Bu F., Gharajeh M.S. Intelligent and vision-based fire detection systems: a survey // *Image and Vision Computing*. 2019. Vol. 91. No. 103803. DOI: 10.1016/j.imavis.2019.08.007
13. Cetin A.E., Dimitropoulos K., Gouverneur B., Grammalidis N., Gunay O., Habiboglu Y.H. et al. Video fire detection : review // *Digital Signal Processing*. 2013. Vol. 23. Pp. 1827–1843. DOI: 10.1016/j.dsp.2013.07.003. EDN RIKHCF.
14. Xie D., Chen Q., Zhu Y. Optimal layout scheme of fire detectors and operation condition monitoring technology in urban integrated substation // *Measurement*. 2024. Vol. 236. No. 115093. DOI: 10.1016/j.measurement.2024.115093
15. Hashemzadeh M., Zademehdi A. Fire detection for video surveillance applications using ICA K-medoids-based color model and efficient spatio-temporal visual features // *Expert Systems with Applications*. 2019. Vol. 130. Pp. 60–78. DOI: 10.1016/j.eswa.2019.04.019
16. Ahn Y., Choi H., Kim B.S. Development of early fire detection model for buildings using computer vision-based CCTV // *Journal of Building Engineering*. 2023. Vol. 65. No. 105647. DOI: 10.1016/j.job.2022.105647
17. Yazdi M., Bouwmans T. New trends on moving object detection in video images captured by a moving camera: A survey // *Computer Science Review*. 2018. Vol. 28. Pp. 157–177. DOI: 10.1016/j.cosrev.2018.03.001
18. Hackner A., Oberpriller H., Ohnesorge A., Hechtenberg V., Müller G. Heterogeneous sensor arrays: Merging cameras and gas sensors into innovative fire detection systems // *Sensors and Actuators B: Chemical*. 2016. Vol. 231. Pp. 497–505. DOI: 10.1016/j.snb.2016.02.081
19. Yar H., Khan Z.A., Rida I., Ullah W., Kim M.J., Baik S.W. An efficient deep learning architecture for effective fire detection in smart surveillance // *Image and Vision Computing*. 2024. Vol. 145. No. 104989. DOI: 10.1016/j.imavis.2024.104989



20. Евсиков А.А., Самарин И.В. Обнаружение очагов возгорания на технологических объектах с использованием сверточной нейронной сети // Пожаровзрывобезопасность/Fire and Explosion Safety. 2023. Vol. 32 (5). Pp. 40–48. DOI: 10.22227/0869-7493.2023.32.05.40-48

## REFERENCES

1. Festag S. The Statistical Effectiveness of Fire Protection Measures: Learning from Real Fires in Germany. *Fire Technology*. 2021; 57:1589-1609. DOI: 10.1007/s10694-020-01073-y
2. Sheng D., Deng J., Zhang W., Cai J., Zhao W., Xiang J. A Statistical Image Feature-Based Deep Belief Network for Fire Detection. *Complexity*. 2021; (1):1-12. DOI: 10.1155/2021/5554316
3. Ma C., Van Coile R., Gernay T. Fire protection costs in composite buildings for cost-benefit analysis of fire designs. *Journal of Constructional Steel Research*. 2024; 215:108517. DOI: 10.1016/j.jcsr.2024.108517
4. Nan C., Xianmeng M., Wenhui D. Experimental Study on the Testing Environment Improvement of Fire Smoke Detectors. *Procedia Engineering*. 2012; 45:610-616. DOI: 10.1016/j.proeng.2012.08.211
5. Kalmykov S.P., Esin V.M. Fire detection time. *Pozharovzryvobezопасnost/Fire and explosion safety*. 2017; 26(11):52-63. (rus).
6. Chlenov A.N., Bucynskaya T.A., Zhuravlev S.Yu., Nikolaev V.A. On the efficiency of the multi-criteria fire alarm. *Pozharovzryvobezопасnost/Fire and explosion safety*. 2016; 25(12):55-60. DOI: 10.18322/PVB.2016.25.12.55-60. EDN XWVMGZ. (rus).
7. Kuznetsov G.V., Volkov R.S., Sviridenko A.S., Strizhak P.A. Fire detection and suppression in rooms with different geometries. *Journal of Building Engineering*. 2024; 90:109427. DOI: 10.1016/j.jobe.2024.109427
8. Kuznetsov G.V., Zhdanova A.O., Volkov R.S., Sviridenko A.S., Strizhak P.A. Smoke deposition and extraction in compartment fires with different ignition sources. *Process Safety and Environmental Protection*. 2024; 187:581-592. DOI: 10.1016/j.psep.2024.05.010
9. Artamonov V.S., Polyakov A.S., Ivanov A.N. Ultra-early and early detection of fires: concepts, application limits and unity. *Pozharovzryvobezопасnost/Fire and explosion safety*. 2016; 25(9):78-83. DOI: 10.18322/PVB.2016.25.09.78-83 (rus).
10. Song Z., Huang X., Jiang J., Pan X. A laboratory approach to CO<sub>2</sub> and CO emission factors from underground coal fires. *International Journal of Coal Geology*. 2020; 219:103382. DOI: 10.1016/j.coal.2019.103382
11. Li Y., Yu L., Zheng C., Ma Z., Yang S., Song F. et al. Development and field deployment of a mid-infrared CO and CO<sub>2</sub> dual-gas sensor system for early fire detection and location. *Spectrochimica Acta Part A: Molecular and Biomolecular Spectroscopy*. 2022; 270:120834. DOI: 10.1016/j.saa.2021.120834
12. Bu F., Gharajeh M.S. Intelligent and vision-based fire detection systems: A survey. *Image and Vision Computing*. 2019; 91:103803. DOI: 10.1016/j.imavis.2019.08.007
13. Cetin A.E., Dimitropoulos K., Gouverneur B., Grammalidis N., Gunay O., Habiboglu Y.H. et al. Video fire detection : review. *Digital Signal Processing*. 2013; 23:1827-1843. DOI: 10.1016/j.dsp.2013.07.003. EDN RIKHCF.
14. Xie D., Chen Q., Zhu Y. Optimal layout scheme of fire detectors and operation condition monitoring technology in urban integrated substation. *Measurement*. 2024; 236:115093. DOI: 10.1016/j.measurement.2024.115093
15. Hashemzadeh M., Zademehdi A. Fire detection for video surveillance applications using ICA K-medoids-based color model and efficient spatio-temporal visual features. *Expert Systems with Applications*. 2019; 130:60-78. DOI: 10.1016/j.eswa.2019.04.019
16. Ahn Y., Choi H., Kim B.S. Development of early fire detection model for buildings using computer vision-based CCTV. *Journal of Building Engineering*. 2023; 65:105647. DOI: 10.1016/j.jobe.2022.105647
17. Yazdi M., Bouwmans T. New trends on moving object detection in video images captured by a moving camera: A survey. *Computer Science Review*. 2018; 28:157-177. DOI: 10.1016/j.cosrev.2018.03.001
18. Hackner A., Oberpriller H., Ohnesorge A., Hechtenberg V., Müller G. Heterogeneous sensor arrays: Merging cameras and gas sensors into innovative fire detection systems. *Sensors and Actuators B: Chemical*. 2016; 231:497-505. DOI: 10.1016/j.snb.2016.02.081
19. Yar H., Khan Z.A., Rida I., Ullah W., Kim M.J., Baik S.W. An efficient deep learning architecture for effective fire detection in smart surveillance. *Image and Vision Computing*. 2024; 145:104989. DOI: 10.1016/j.imavis.2024.104989
20. Evsikov A.A., Samarina I.V. Detecting Fire Sources at Technological Facilities Using a Convolutional Neural Network. *Pozharovzryvobezопасnost/Fire and explosion safety*. 2023; 32(5):40-48. DOI: 10.22227/0869-7493.2023.32.05.40-48 (rus).

Поступила 24.10.2024, после доработки 22.01.2025;

принята к публикации 25.01.2025

Received October 24, 2024; Received in revised form January 22, 2025;

Accepted January 25, 2025

**Информация об авторах**

**ГЛОТОВ Максим Иванович**, аспирант Инженерной школы ядерных технологий, Национальный исследовательский Томский политехнический университет, Россия, 634050, г. Томск, пр-т Ленина, 30; ORCID: 0000-0001-6345-1712; ResearcherID: JXL-9108-2024; Scopus AuthorID: 57210585790; e-mail: mig13@tpu.ru

**КРОПОТОВА Светлана Сергеевна**, канд. физ.-мат. наук, доцент Исследовательской школы физики высокоэнергетических процессов, Национальный исследовательский Томский политехнический университет, Россия, 634050, г. Томск, пр-т Ленина, 30; ORCID: 0000-0002-3428-4270; ResearcherID: AAH-6091-2021; Scopus AuthorID: 57215660479; e-mail: ssk22@tpu.ru

**СТРИЖАК Павел Александрович**, д-р физ.-мат. наук, профессор НОЦ И.Н. Бутакова Инженерной школы энергетики, Национальный исследовательский Томский политехнический университет, Россия, 634050, г. Томск, пр-т Ленина, 30; ORCID: 0000-0003-1707-5335; ResearcherID: K-5787-2015; Scopus AuthorID: 24605528800; e-mail: pavelspa@tpu.ru

**Вклад авторов:**

**Глотов М.И.** — проведение экспериментов; написание исходного текста.

**Кропотова С.С.** — доработка текста; итоговые выводы.

**Стрижак П.А.** — концепция исследования; научное руководство.

*Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.*

**Information about the authors**

**Maksim I. GLOTOV**, Postgraduate student of the School of Nuclear Technology, National Research Tomsk Polytechnic University, Lenin Ave., 30, Tomsk, 634050, Russian Federation; ORCID: 0000-0001-6345-1712; ResearcherID: JXL-9108-2024; Scopus AuthorID: 57210585790; e-mail: mig13@tpu.ru

**Svetlana S. KROPOTOVA**, Cand. Sci. (Phys.-Math.), Docent of the Research School of High-Energy Physics, National Research Tomsk Polytechnic University, Lenin Ave., 30, Tomsk, 634050, Russian Federation; ORCID: 0000-0002-3428-4270; ResearcherID: AAH-6091-2021; Scopus AuthorID: 57215660479; e-mail: ssk22@tpu.ru

**Pavel A. STRIZHAK**, Dr. Sci. (Phys.-Math.), Professor of the Scientific and Educational Center I.N. Butakova of the School of Energy Engineering, National Research Tomsk Polytechnic University, Lenin Ave., 30, Tomsk, 634050, Russian Federation; ORCID: 0000-0003-1707-5335; ResearcherID: K-5787-2015; Scopus AuthorID: 24605528800; e-mail: pavelspa@tpu.ru

**Contribution of the authors:**

**Glotov M.I.** — conducting experiments; writing the source text.

**Kropotova S.S.** — revision of the text; final conclusions.

**Strizhak P.A.** — the concept of the study; scientific guidance.

*The authors declare no conflict of interests.*

ПОЖАРОВЗРЫВБЕЗОПАСНОСТЬ/FIRE AND EXPLOSION SAFETY. 2025. Т. 34. № 1. С. 79–84  
POZHAROVZRYVOBEZOPASNOST/FIRE AND EXPLOSION SAFETY. 2025; 34(1):79-84

УДК 614.84

<https://doi.org/10.22227/0869-7493.2025.34.01.79-84>

## Пожарная опасность накопления пыли в электроустановках. Часть 2

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

Рассмотрены примеры случаев накопления пыли в различных электроустановках. Выполнен обзор существующих методов очистки электрооборудования от пыли и других загрязнений. Даны разъяснения по особенностям выбора и преимущественных областях применения отдельных способов очистки. Показана возможность проведения очистки электрооборудования без снятия напряжения. Представлен вариант использования комбинированного способа удаления загрязнений.

**Ключевые слова:** техническое обслуживание; продувка сжатым воздухом; растворители; сухой лед; сухая вода; охлаждение

**Для цитирования:** Харламенков А.С. Пожарная опасность накопления пыли в электроустановках. Часть 2 // Пожаровзрывобезопасность/Fire and Explosion Safety. 2025. Т. 34. № 1. С. 79–84. DOI: 10.22227/0869-7493.2025.34.01.79-84

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

## Fire hazard of dust accumulation in electrical installations. Part 2

Aleksandr S. Kharlamenkov ✉

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

### ABSTRACT

Examples of dust accumulation in various electrical installations are considered. A review of existing methods for cleaning electrical equipment from dust and other contaminants is provided. Explanations are given on the peculiarities of selection and preferred areas of application of individual cleaning methods. The possibility of cleaning electrical equipment without removing voltage is shown. A variant of using a combined method for removing contaminants is presented.

**Keywords:** maintenance; compressed air blowing; solvents; dry ice; dry water; cooling

**For citation:** Kharlamenkov A.S. Fire hazard of dust accumulation in electrical installations. Part 2. *Pozharovzryvobezopasnost/Fire and Explosion Safety*. 2025; 34(1):79-84. DOI: 10.22227/0869-7493.2025.34.01.79-84 (rus).

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

### ВОПРОС



В рубрике «Вопрос – ответ» журнала № 4 за 2024 г. [1] были рассмотрены требования действующих нормативных документов по очистке электрооборудования от пыли и других загрязнений, накопление которых способствует развитию аварийных ситуаций с появлением источников зажигания и последующим возникновением пожара.

Выполнение периодической очистки пыльных и загрязненных поверхностей электроустановок позволяет снизить вероятность пожара от электрооборудования зданий и сооружений. Порядок и периодичность

уборки пыли должны определяться техническим регламентом выполнения работ и указываться в инструкции о мерах пожарной безопасности. Помимо соблюдения графиков планово-предупредительного ремонта собственник объекта (руководитель организации) или назначенное им ответственное лицо должны иметь представление о существующих и безопасных способах удаления пыли и других загрязнений с поверхностей электроустановок.

Какие методы очистки электрооборудования применяются в современной практике технического обслуживания электроустановок для обеспечения их пожарной безопасности?

## ОТВЕТ

Как известно, накопление пыли на поверхностях различных электроустановок приводит к ухудшению теплоотвода от нагретых элементов оборудования, что способствует локальному перегреву изоляционных материалов. Ускоренное тепловое старение изоляции создает условия для возникновения искровых и дуговых пробоев, которые не только становятся причиной нарушений в работе оборудования, но и способны воспламенить слои осевшей пыли и других горючих отложений. Например, исследование [2], посвященное влиянию запыленности среды на срок службы электродвигателей, показало, что пробои изоляции наблюдались в лобовой части обмотки статора асинхронных двигателей, где чаще всего происходило накопление пыли толщиной до 30 мм. Выполненное моделирование процесса накопления пыли толщиной 15 мм с различными коэффициентами теплопроводности на обмотках статора позволило определить температуру изоляции, расчетные значения которой превысили допустимые величины на 9–19 °С. Таким образом, согласно правилу «восьми градусов» (правило Монтзигера), повышение температуры обмоток на каждые 8 °С сверх предельно допустимой ведет к сокращению срока службы изоляции вдвое. Это является причиной более раннего выхода электродвигателей из строя и возникновения токовых перегрузок в питающих групповых электрических сетях.

Сопротивление изоляции кабельных изделий, обеспечивающих работу электроустановок зданий и сооружений, может также со временем ухудшаться из-за оседания электропроводящей пыли<sup>1</sup> с возникновением поверхностных токов утечки [3]. В кабельных лотках и вблизи кабельных проходок при групповой прокладке, расположенных на высоте<sup>2</sup> более 3,5 м, где проведение технического обслуживания по очистке поверхностей затруднительно, могут наблюдаться значительные отложения пыли, способствующие ухудшению теплоотвода с локальным повышением температуры проводников и снижению электрической прочности изоляции. Поэтому до начала выполнения профилактических мероприятий необходимо выполнить предварительную оценку потенциальных мест скопления пыли, что в дальнейшем позво-

лит оптимизировать процесс выполнения работ по техническому обслуживанию действующих электроустановок объекта и повысить его эффективность в целом.

При проведении предварительного анализа запыленности электроустановок на объекте следует уделять внимание электрическим щитам, смонтированным в местах проведения строительно-монтажных и реставрационных работ. Как показывает практика<sup>3</sup>, в процессе выполнения ремонтных работ образующаяся в помещениях строительная пыль в большом количестве оседает на поверхностях аппаратов защиты, установленных в электрическом щите. Мелкодисперсные частицы пыли попадают в углубления под клеммы, а также в зазоры между корпусом аппарата и рычагами (кнопками) управления (рис. 1). При подключении электропроводки к запыленным аппаратам защиты в местах клеммных соединений создаются условия для возникновения больших переходных сопротивлений (БПС), а также искрений. Кроме этого, накопление пыли в местах расположения рычагов отключения и других подвижных элементов аппарата, в том числе и внутри корпуса, может привести к заклиниванию механизма отключения в момент аварийного режима работы. Поэтому при выполнении различных видов ремонтных работ, сопровождающихся образованием строительной пыли, необходимо заранее обеспечить защиту внутреннего объема электрических щитов от попадания мелких частиц через неплотно закрытую дверцу или вводы кабелей. В противном случае на этапе приемо-сдаточных испытаний (если они предусмотрены) может потребоваться замена отдельных модулей или всей сборки.

Для исключения возникновения вышеперечисленных и аналогичных случаев накопления пыли в электроустановках необходимо регулярно выполнять обслуживание оборудования с помощью эффективных и безопасных способов очистки.

В отличие от бытовых помещений, где влажная уборка пыли выполняется регулярно, обслуживание электроустановок требует особых подходов. Использование воды или химических растворов на водной основе недопустимо для отдельных типов оборудования, в том числе находящегося под напряжением. Это обусловлено риском возникновения коротких замыканий и поражения персонала электрическим током. Наибольшие сложности возникают при очистке закрытых участков сетей (электрические щиты, распределительные и распаячные коробки и т.д.), где плотное расположение проводников и аппаратов защиты ограничивает доступ к загрязненным поверхностям.

Все способы удаления пыли и других загрязнений с электрооборудования можно условно разделить на механические и химические; со снятием и без снятия напряжения.

<sup>1</sup> По ГОСТ 31610.10-2-2017/IEC 60079-10-2:2015 «Взрывоопасные среды. Часть 10-2. Классификация зон. Взрывоопасные пылевые среды» электропроводящая пыль — это горючая пыль с электрическим сопротивлением, равным или меньше 10<sup>3</sup> Ом·м (например, металлическая или угольная пыль).

<sup>2</sup> Высота обслуживания электроустановок 3,5 м выбрана исходя из требований Приказа Минтруда России «Об утверждении Правил по охране труда при работе на высоте» № 782н от 16.11.2020 г., в п. 3 которого указывается опасное значение высоты возможного падения работника — 1,8 м и более. Следовательно, для проведения безопасного обслуживания электроустановки, расположенной на высоте 3,5 м, работнику со средним ростом 1,65–1,75 м может потребоваться подняться на высоту 1,8 м, что будет считаться работой на высоте с получением дополнительных разрешений на такой вид работ и усилением мер безопасности.

<sup>3</sup> Пыль в щитах, кривые руки и тройная переплата. URL: <https://cs-cs.net/pyl-v-shitax-i-krivye-ruki-pervomajskaya> (дата обращения: 23.12.2024).



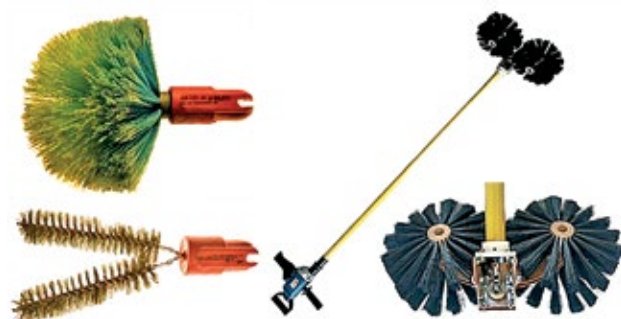


a

b

**Рис. 1.** Накопление пыли во внутреннем пространстве электрических щитов на аппаратах защиты

Наиболее распространенным способом механического удаления пыли и других загрязнений является очистка с помощью ручного инструмента в виде щеток, тряпок, ветоши. Работы по обслуживанию электроустановок с помощью указанных выше материалов в большинстве случаев требуется выполнять при снятом напряжении за исключением отдельных случаев [4], когда применяются специальные щетки с изоляционными штангами или диэлектрическими насадками для очистки проводов и изоляторов в высоковольтных линиях под напряжением (рис. 2). Данный способ механической очистки не позволяет полностью удалить имеющиеся загрязнения, особенно в труднодоступных местах, поэтому чаще всего применяется совместно с другими методами очистки. К таким методам можно отнести удаление пыли с помощью пылесоса. В этом случае удаляемая пыль не перераспределяется на соседние поверхности и не переходит во взвешенное состояние, а скапливается в пылесборнике пылесоса. В то же время такой способ не всегда позволяет удалить плотные скопления пыли в труднодоступных местах и может представлять опасность, связанную с механическим повреждением мелких компонентов оборудования при их контакте с всасывающей насадкой пылесоса.



**Рис. 2.** Примеры диэлектрических штанг и насадок для удаления пыли в электроустановках под напряжением

Одним из самых простых и достаточно распространенных методов очистки электрооборудования является продувка труднодоступных участков потоком сжатого воздуха (углекислого газа, азота и другого) под высоким давлением. Данный вариант очистки рекомендуется выполнять на открытом пространстве или в хорошо проветриваемых помещениях с использованием индивидуальных средств защиты глаз и дыхательных путей. При всей эффективности данный метод также имеет ряд существенных недостатков:

- устраняются только поверхностные загрязнения, тогда как скрытые в глубине и более плотные отложения пыли остаются нетронутыми;
- в процессе очистки взвешенные частицы пыли могут оседать на соседнем оборудовании;
- существует высокий риск повреждения слабо закрепленных элементов под воздействием сильного воздушного потока;
- существует вероятность образования электростатических разрядов при контакте струи воздуха с поверхностями, что может привести к поломке электронных компонентов или воспламенению пылевой взвеси.

В качестве альтернативы вышеприведенному способу может использоваться метод механической очистки электрооборудования с помощью сухого льда (гранулы углекислого газа в твердом состоянии) [5]. Данный вариант относится к неабразивным методам очистки различных загрязнений за счет сочетания кинетического и термического воздействия на поверхность гранул  $\text{CO}_2$  размером до 3 мм с температурой  $-79^\circ\text{C}$ , которые разгоняются за счет сжатого воздуха до скорости 150 м/с (540 км/ч) с помощью специального пистолета с насадкой (криогенный бластер). Попадая на очищаемую поверхность под высоким давлением, гранулы замораживают загрязнения, вызывая их растрескивание. После этого, проникая в образовавшиеся трещины, частицы углекислоты практически мгновенно сублимируют (переходят из твердого состояния в газообразное), вызы-



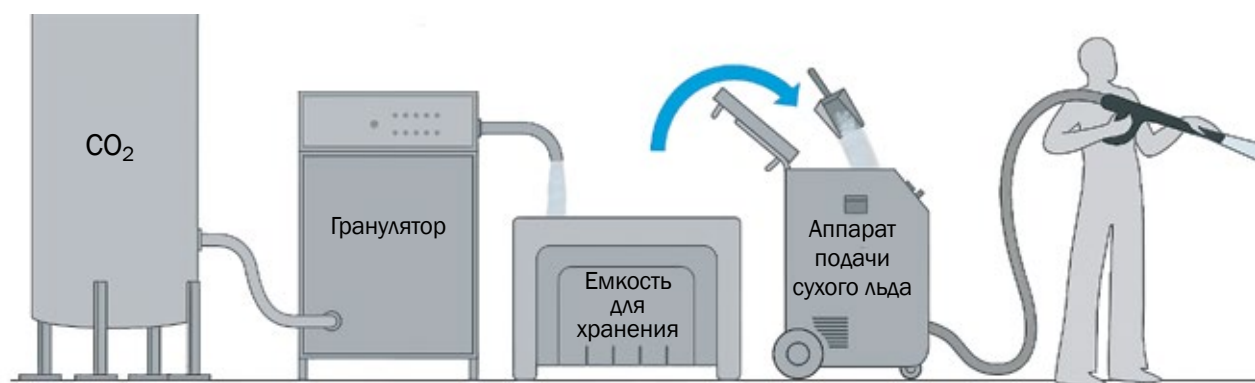


Рис. 3. Пример устройства системы очистки электрооборудования с помощью сухого льда

вая микровзрывы и разрушение загрязнений, которые в результате отделяются от очищаемой поверхности. Так как сухой лед имеет твердость 1,5–2 по шкале Мооса (для обычного кварцевого песка по данной шкале твердость составляет 7), поэтому считается очень щадящим средством, способным очищать большинство поверхностей, не повреждая их, и при этом достаточно эффективным, чтобы удалять многолетние отложения с поверхности электроустановок. Кроме этого, гранулы сухого льда обладают хорошими диэлектрическими свойствами, что в теории позволяет использовать данный метод очистки без предварительного обесточивания электрооборудования.

На практике очистка электрооборудования под напряжением с помощью сухого льда не рекомендуется из-за повышенного риска короткого замыкания или поражения персонала электрическим током по причине возможного образования конденсата и случайного контакта человека или рабочего оборудования с токоведущими частями электроустановки.

Единственным недостатком данного метода является необходимость применения специального оборудования, в состав которого входит баллон с  $\text{CO}_2$ , гранулятор сухого льда, емкость для его хранения и транспортировки, а также оборудование для измельчения и подачи гранул на очищаемую поверхность (рис. 3). Сам процесс состоит из нескольких этапов. Сначала сжиженный углекислый газ под высоким давлением подается в гранулятор, где в процессе перепада давления  $\text{CO}_2$  превращается в сухой лед. Далее гидравлический пресс уплотняет ледяную массу, которая затем продавливается через экструдер, формируя палочки спрессованного сухого льда, загружаемые в специальный транспортировочный контейнер. В месте выполнения работ по очистке оборудования палочки спрессованного льда загружаются в аппарат подачи готовой смеси.

Более эффективным, но менее бюджетным является метод очистки электрооборудования диэлектрическими химическими составами<sup>4</sup>. Среди наиболее эффективных веществ для проведения химической очистки электро-

оборудования можно выделить: фторированные растворители («сухая вода», ФК-5-1-12, ПФК-49 или Noves 1230; Noves 7300, 7100 и 649<sup>5</sup> и другие); гидрофторэфиры (HFE-7100 и 7200); перфторуглероды (PFC-5060 и 5070); изопропиловый спирт (IPA); минеральные и синтетические масла. За исключением изопропилового спирта и масел, перечисленные выше вещества можно применять для очистки оборудования под напряжением, так как они имеют высокую диэлектрическую прочность (30–40 кВ/мм) и являются негорючими<sup>6</sup> [6]. За счет различного химического состава и отдельных свойств данные вещества используются для очистки различных типов установок (табл.).

Фторкетоны, применяемые в качестве иммерсионных жидкостей в системах охлаждения серверов, майнинговых ферм и другого оборудования, позволяют исключить накопление пыли и других загрязнений на рабочих поверхностях электроустановок за счет их полного погружения в жидкость. Такое техническое решение позволяет обеспечить длительную работу оборудования без необходимости проведения его регулярной очистки.

В патенте RU 2685212 C1<sup>7</sup> предлагается многоэтапный метод очистки с использованием жидких диэлектрических очистителей. Основные этапы включают в себя:

- нанесение очистителя с помощью направленной струей диэлектрической жидкости (0,1 л/м<sup>2</sup>) для размягчения загрязнений;
- выдержку вещества на обрабатываемой поверхности (до 15 мин) для ослабления адсорбционной связи загрязнений с поверхностью;

<sup>5</sup> Фторкетоны могут использоваться в качестве эффективных очистителей электрооборудования за счет хороших диэлектрических и экологических свойств, а также за счет быстрого испарения (температура кипения 34–61 °С), но при этом активно используются в качестве огнетушащих веществ в системах пожаротушения [7] и иммерсионных жидкостей в системах охлаждения электроустановок [8].

<sup>6</sup> Официальный сайт компании «ТЭКМАНН» — промышленные моющие машины, ультразвуковые ванны, технические моющие средства. URL: <https://techmann.ru/> (дата обращения: 20.01.2025).

<sup>7</sup> Патент RU 2685212 C1. Способ очистки электрооборудования / Квасников И.Н., Ежунов Е.М.; опубл. 16.04.2019. Бюл. № 11.

<sup>4</sup> Современные способы очистки электрооборудования под напряжением. Диэлектрический очиститель для электроники и иммерсионные жидкости. URL: [ovremennye\\_sposoby\\_ochistki\\_elektroobor/](https://ovremennye_sposoby_ochistki_elektroobor/) (дата обращения: 15.01.2025).

Преимущественные области применения веществ для химической очистки электрооборудования

Вещество	Преимущественные области применения вещества	Степень пожарной опасности
Фторированные растворители (Novac 7300, 7100, 1230, 649)	Очистка распределительных устройств, электрических щитов, аппаратов и приборов, серверов, печатных плат и их компонентов с высокой плотностью монтажа	Негорючее вещество (низкая опасность)
Гидрофторэфиры (HFE-7100, HFE-7200)	Очистка электроники, телекоммуникационного оборудования, медицинских устройств	
Перфторуглероды (PFC-5060, PFC-5070)	Очистка оборудования в аэрокосмической и военной промышленности, где требуется высокая химическая стабильность веществ	
Изопропиловый спирт (IPA)	Очистка печатных плат, контактов, удаление флюсов и загрязнений в электронике	Легковоспламеняющаяся жидкость (высокая опасность)
Минеральные и синтетические масла	Очистка крупного промышленного оборудования, трансформаторов, механических компонентов	Горючие жидкости (средняя опасность)

- смыв загрязнений струей промывочной жидкости (до 2,0 л/м<sup>2</sup>) под давлением до 15 МПа с использованием влагопоглощающего материала;
- сушку обработанной поверхности путем обдува воздухом для удаления остатков жидкости.

Для выполнения указанной многоэтапной процедуры очистки используются изопарафины, фторированные углеводороды и поверхностно активные вещества (ПАВ). Различный состав очистителей позволяет выполнять очистку по трем различным вариантам в зависимости от степени загрязнения поверхности. Для легких загрязнений используется комбинация изопарафинов, бензола и ПАВ, для средних загрязнений — изопарафины, алкильные производные бензола и ПАВ, а для стойких отложений — изопарафины, 2-(2-бутоксизтокси)этилацетат (C<sub>10</sub>H<sub>20</sub>O<sub>4</sub>) и ПАВ. Кроме этого, данный метод обеспечивает антистатический эффект, предотвращая повторное загрязнение поверхности электрооборудования.

В реферате на патент<sup>7</sup> отмечается, что представленный метод позволяет выполнять очистку электрооборудования без его отключения (при температуре поверхности

≤ 80 °С), что критично для непрерывных производств. При этом следует учитывать, что бензол и его алкильные производные относятся к пожаровзрывоопасным веществам и способны создавать с воздухом взрывоопасные смеси.

Анализ различных методов и способов очистки показывает, что выбор и применение тех или иных веществ и материалов для проведения очистки электроустановок от пыли и других загрязнений во многом зависит от типа оборудования, его размеров, места расположения и возможности обесточивания. В каждом конкретном случае следует выбирать наиболее безопасные и эффективные способы очистки с учетом рекомендаций, представленных в паспортах и инструкциях по эксплуатации электрооборудования.

Рассмотренные в статье варианты очистки, в том числе их комбинации, позволяют выполнять качественное техническое обслуживание электроустановок и другого технологического оборудования, предотвращая нежелательное накопление пыли и снижая риски возникновения пожаров с ее участием.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Харламенков А.С. Пожарная опасность накопления пыли в электроустановках. Часть 1. Пожаровзрывобезопасность/Fire and Explosion Safety. 2024. Т. 33. № 4. С. 108–112. DOI: 10.22227/0869-7493.2024.33.04.108-112

2. Кривоносов В.Е., Василенко С.В. Влияние запыленной среды на срок службы обмоток статора асинхронных двигателей // Энергетика. Известия высших учебных заведений и энергетических объединений СНГ. 2015. № 6. С. 35–40. EDN VJJZCX.

3. Смелков Г.И. Пожарная безопасность электропроводок. М. : ООО «КАБЕЛЬ», 2009. 328 с.

4. Разогреев О.Е., Сошинов А.Г., Шаймухаметов А.Р. Как чистить и обслуживать электроустановки под напряжением: обзор оборудования и рекомендации по его применению от производителя // Промышленная безопасность. Разъяснения. Вопросы и ответы. 2023. № 5 (20). С. 70–81.

5. Kay John A., Green G. Dry ice cleaning of electrical equipment: revitalize electrical assets with precision cleaning // IEEE Industry Applications Magazine. 2024. Vol. 30 (5). Pp. 14–23. DOI: 10.1109/MIAS.2024.3393433

6. Wu X., Huang J., Zhuang Y., Ying Liu, Jialiang Yang, Hongsheng Ouyang et al. Prediction models of saturated vapor pressure, saturated density, surface tension, viscosity and thermal conductivity of electronic fluoride liquids

in two-phase liquid immersion cooling systems : a comprehensive review // Applied Sciences. 2023. Vol. 13 (7). 32 p. DOI: 10.3390/app13074200

7. Игаева А.Ю., Евдошенко В.В., Сычев М.А. Использование «сухой воды» в автоматических установках газового пожаротушения // Инновационное развитие регионов: потенциал науки и современного образования : мат. Нац. науч.-практ. конф. Астрахань, 2018. Т. 1. С. 63–65. EDN NUEYKD.

8. Кондурцова Т.М. Двухфазная система жидкостного охлаждения серверов // Перспективные направления развития отечественных информационных технологий : мат. III Межрег. науч.-практ. конф. Севастополь, 2017. С. 146–149. EDN ХОВРРР.

*Материал поступил в редакцию 15.02.2025*

*Received February 15, 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 «ПОЖАРОВЗРЫВОБЕЗОПАСНОСТЬ/FIRE AND EXPLOSION SAFETY» статьи должны содержать результаты научных исследований и испытаний, описания новых технических устройств и программно-информационных продуктов; обзоры, комментарии к нормативно-техническим документам, справочные материалы и т.п. Авторы должны указать, к какому типу относится их статья:

- научно-теоретическая;
- научно-эмпирическая;
- аналитическая (обзорная);
- дискуссионная;
- рекламная.

Не допускается направлять в редакцию работы, которые были опубликованы и/или приняты к печати в других изданиях.

Редакция просит авторов при подготовке рукописи руководствоваться изложенными ниже правилами.

**1.** Статья и сопутствующие ей материалы должны быть направлены через электронную редакцию по адресу [info@fire-smi.ru](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 непереводаемых названий собственных имен, приборов и других объектов, имеющих собственные названия, а также непереводаемый сленг, известный только русскоговорящим специалистам. Это касается также аннотаций, авторских резюме и ключевых слов.

**2.3.** Информация об авторах.

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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



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

Сокращения и условные обозначения физических величин в тексте статьи должны соответствовать действующим международным стандартам. Формулы и буквенные обозначения должны быть четкими и ясными. Все буквенные обозначения, входящие в формулы, должны быть расшифрованы с указанием единиц измерения. Размерность всех характеристик должна соответствовать системе СИ. Иллюстрации в электронной версии прилагаются отдельно. Фотографии должны быть сделаны с хорошего негатива контрастной печатью (файлы растровых изображений предоставляются с разрешением не менее 300 dpi, черно-белая штриховая графика — 600 dpi). Файлы векторной графики следует предоставлять в формате той программы, в которой они созданы, либо печатать PDF-файл из этой программы. Все иллюстрации должны иметь сквозную нумерацию. Чертежи и карты в качестве иллюстраций неприемлемы. Ссылки на все рисунки в тексте обязательны.

Таблицы должны быть составлены лаконично и содержать только необходимые сведения; однотипные таблицы следует строить одинаково. Цифровые данные необходимо округлять в соответствии с точностью эксперимента. Сведения в таблицах и на рисунках не должны повторяться. Ссылки на все таблицы в тексте обязательны.

В журнале предусматривается двуязычное представление табличного и графического материала, поэтому необходимо прислать перевод на английский язык:

- для таблицы: ее названия, шапки, боковика, текста во всех строках, сноска и примечаний;
- для рисунка: подписочной подписи и всех текстовых надписей на самом рисунке;
- для схемы: подписи к ней и всего содержания самой схемы.

## 2.7. Пристайные списки литературы на русском языке и языке оригинала (если книга переводная).

Список литературы должен включать библиографические сведения обо всех публикациях, упоминаемых в статье, и не должен содержать указаний на работы, на которые в тексте нет ссылок. Литература должна быть оформлена в виде общего списка в порядке упоминания. В тексте ссылка на литературу отмечается порядковой цифрой в квадратных скобках, например [1]. Библиографические данные приводятся по титульному листу издания. Порядок изложения элементов библиографического описания определяется требованиями ГОСТ 7.1-2003 и ГОСТ Р 7.0.5-2008.

В описании источников необходимо указывать всех авторов.

Наряду с этим для научных статей список литературы должен отвечать следующим требованиям.

Список литературы должен содержать не менее 20 источников (в это число не входят нормативные документы, патенты, ссылки на сайты компаний и т.п.). При этом количество ссылок на статьи из иностранных научных журналов и другие иностранные источники должно быть не менее 40 % от общего количества ссылок. Не более половины от оставшихся 60 % должны составлять статьи из русскоязычных научных журналов, остальное — другие первоисточники на русском языке.

Не менее половины источников должно быть включено в один из ведущих индексов цитирования: Российский индекс научного цитирования eLibrary, Web of Science, Scopus, Chemical Abstracts, MathSciNet, Springer и др. В случае присвоения публикациям цифрового идентификатора объекта (DOI) его необходимо указать, что позволит однозначно идентифицировать объект в базах данных.

Состав источников должен быть актуальным и содержать не менее половины современных (не старше 10 лет) статей из научных журналов или других публикаций.

В списке литературы должно быть не более 30 % источников, автором либо соавтором которых является автор статьи.

Следует обратить внимание на публикации диссертаций (особенно докторских), защищенных в последние годы по ближайшей научной специальности или группе специальностей. Для поиска рекомендуется использовать ресурс <http://www.dissercat.com>.

Не следует включать в список литературы ГОСТы; ссылки на них должны быть даны непосредственно по тексту статьи.

Убедитесь, что указанная в списке литературы информация (Ф.И.О. автора, название книги или журнала, год издания, том, номер и количество (интервал) страниц) верна.

Неопубликованные результаты, проекты документов, личные сообщения и т.п. не следует указывать в списке литературы, но они могут быть упомянуты в тексте.

**2.8. References** (пристайные списки литературы на английском языке). Представление в References только транслитерированного (без перевода) описания недопустимо. Обращаем Ваше внимание, что перевод названия статей следует давать так, как он проходил при их публикации, а перевод названий журналов должен быть официально принятым. Произвольное сокращение названий источников цитирования приведет к невозможности идентифицировать ссылку в электронных базах данных.

При составлении References необходимо следовать схеме:

- ИОФ авторов (транслитерация; для ее написания используйте сайт <http://fotosav.ru/services/transliteration.aspx>, обязательно включив в настройках справа вверху флажок «Американская (для визы США)»; если автор цитируемой статьи имеет свой вариант транслитерации своей фамилии, следует использовать этот вариант);
- заглавие на английском языке — для статьи, транслитерация и перевод названия — для книги;
- название источника (журнала, сборника статей, материалов конференции и т.п.) в транслитерации и на английском языке (курсивом, через косую черту);
- выходные данные;
- указание на язык изложения материала в скобках (например, (in Russian)).

Например: D.N. Sokolov, L.P. Vogman, V.A. Zuykov. Microbiological spontaneous ignition. *Pozharnaya bezopasnost / Fire Safety*, 2012, no. 1, pp. 35-48 (in Russian) (Другие примеры см. [www.fire-smi.ru](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!