

6-2025

FIRE SAFETY ПОЖАРОВЗРЫВО-

БЕЗОПАСНОСТЬ

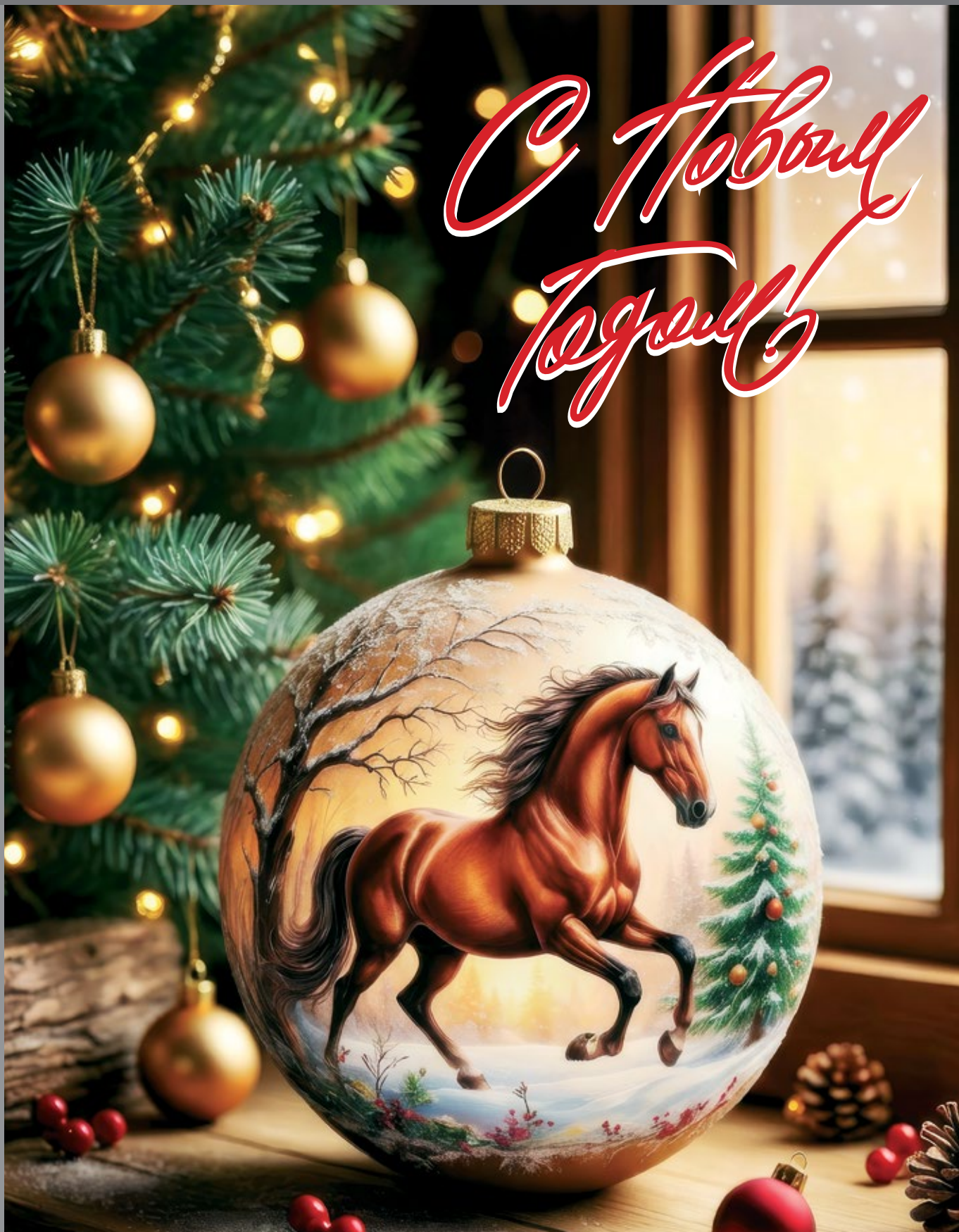


НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКИЙ ЖУРНАЛ

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

КОМПЛЕКСНАЯ БЕЗОПАСНОСТЬ

пожарная • промышленная • производственная • экологическая



*С Новым
Годом!*

УЧРЕДИТЕЛЬ и ИЗДАТЕЛЬ —

ФГБОУ ВО «Национальный
исследовательский
Московский государственный
строительный университет»

Адрес:

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

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

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

РЕДАКЦИЯ:

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

Адрес редакции:

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

Адрес для переписки:

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

E-mail: info@fire-smi.ru

https://www.fire-smi.ru

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

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

Подписано в печать 29.12.2025.

Выход в свет 30.12.2025.

Формат 60 × 84 1/8. Тираж 2000 экз.

Бумага мелованная матовая.

Печать офсетная. Цена свободная.

Распространяется по подписке.

Отпечатано в типографии

Издательства МИСИ – МГСУ

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

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

ГЛАВНЫЙ РЕДАКТОР:

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

ЗАМ. ГЛАВНОГО РЕДАКТОРА:

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

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

РЕДАКЦИОННАЯ КОЛЛЕГИЯ:

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

СОДЕРЖАНИЕ

CONTENTS

ПРОЦЕССЫ ГОРЕНИЯ, ДЕТОНАЦИИ И ВЗРЫВА

COMBUSTION, DETONATION AND EXPLOSION PROCESSES

Н.Л. ПОЛЕТАЕВ
Признаки взрывобезопасности пыли полимера,
вспучивающегося при нагревании

5

N.L. POLETAEV
Signs of explosion safety of polymer
dust that swells when heated

БЕЗОПАСНОСТЬ ВЕЩЕСТВ И МАТЕРИАЛОВ

SAFETY OF SUBSTANCES AND MATERIALS

С.В. ПУЗАЧ, О.С. ЛЕБЕДЧЕНКО, Р.Г. АКПЕРОВ
Новые данные по токсичности продуктов
терморазложения изоляции не распространяющихся
горение кабелей

12

S.V. PUZACH, O.S. LEBEDCHENKO, R.G. AKPEROV
New data on the toxicity
of thermal decomposition products from
flame-retardant cable insulation

БЕЗОПАСНОСТЬ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ И ОБОРУДОВАНИЯ

SAFETY OF TECHNOLOGICAL PROCESSES AND EQUIPMENT

Е.Е. ПРОСТОВ, Д.М. ГОРДИЕНКО,
Е.Н. ПРОСТОВ, Д.В. ДОЛГИХ
Методика повышения уровня пожарной безопасности
путем применения газоанализаторов на объектах хранения
и обслуживания автомобилей, оснащенных
газобаллонным оборудованием

23

E.E. PROSTOV, D.M. GORDIENKO,
E.N. PROSTOV, D.V. DOLGIKH
Methodology for improving fire safety through
the use of gas analyzers at vehicle storage
and service facilities equipped with gas
cylinder equipment

БЕЗОПАСНОСТЬ ЗДАНИЙ, СООРУЖЕНИЙ, ОБЪЕКТОВ

SAFETY OF BUILDINGS, STRUCTURES, OBJECTS

Е.В. ГВОЗДЕВ
Разработка модели управления
комплексной безопасностью
на взрывопожароопасных предприятиях

33

E.V. GVOZDEV
Development of a comprehensive safety
management model for explosion
and fire hazardous enterprises

ЭКОНОМИКА И УПРАВЛЕНИЕ ПОЖАРНОЙ И КОМПЛЕКСНОЙ БЕЗОПАСНОСТЬЮ

ECONOMICS AND FIRE AND COMPLEX SAFETY CONTROLE

Ю.С. КЛОЧКОВ, А.М. ТВЕРЯКОВ, Н.О. КОВАЛЬ
Интеграция методов менеджмента качества
для решения задач управления
безопасностью продукции

49

Yu.S. KLOCHKOV, A.M. TVERYAKOV, N.O. KOVAL
Integration of quality management
methods for solving product safety
management tasks

ОБЩИЕ ВОПРОСЫ КОМПЛЕКСНОЙ БЕЗОПАСНОСТИ

GENERAL QUESTIONS OF COMPLEX SAFETY

А.В. АЛЕКСАНДРОВА, Р.Е. ПОПКО
Ссовершенствование обоснования выбора
технических решений системы пожарной безопасности
объекта защиты на основе учета удельной массовой
скорости выгорания для веществ и материалов

58

A.V. ALEKSANDROVA, R.E. POPKO
Improving the justification of the choice of technical solutions
for the fire safety system of the protected object based
on the specific mass fraction of burning for substances
and materials

СРЕДСТВА И СПОСОБЫ ТУШЕНИЯ ПОЖАРОВ

MEANS AND WAYS OF FIRE EXTINGUISHING

Ю.Н. ШЕБЕКО
Международный опыт обеспечения
пожарной безопасности применения
литий-ионных батарей

67

Yu.N. SHEBEKO
International experience in ensuring
fire safety using lithium-ion
batteries

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.



Признаки взрывобезопасности пыли полимера, вспучивающегося при нагревании

Стр. 5



Стр. 12

Новые данные по токсичности продуктов терморазложения изоляции не распространяющих горение кабелей



Методика повышения уровня пожарной безопасности путем применения газоанализаторов на объектах хранения и обслуживания автомобилей, оснащенных газобаллонным оборудованием

Стр. 23



Стр.58

Совершенствование системы пожарной безопасности объекта на основе учета удельной массовой скорости выгорания веществ

Стр. 67



Международный опыт обеспечения пожарной безопасности применения литий-ионных батарей

КОМПЛЕКСНАЯ БЕЗОПАСНОСТЬ

ПОЖАРНАЯ • ПРОМЫШЛЕННАЯ • ПРОИЗВОДСТВЕННАЯ • ЭКОЛОГИЧЕСКАЯ

No. **6** VOL. **34**
2025

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

SCIENTIFIC AND TECHNICAL JOURNAL

EXPLOSION



**FIRE AND
SAFETY**

POZHAROVZRYVOBEZOPASNOST

FOUNDER and PUBLISHER —

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

Address:

26 Yaroslavskoe shosse, Moscow,
129337, Russia

Journal founded in 1992,
issued 6 times per year.

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

DOI prefix: 10.22227.

EDITORIAL STAFF:

Executive editor **Tabekova A.R.**

Editor **Korzukhina L.B.**

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

Corrector **Ermikhina O.V.**

Layout **Aleynikova Y.Z.**

Address of Editorial Staff:

26 Yaroslavskoe shosse, Moscow,
129337, Russia

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

E-mail: info@fire-smi.ru

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 29.12.2025.

Date of publication 30.12.2025.

Format is 60 × 84 1/8.

Printing is 2000 copies.

Chalk-overlay mat paper.

Offset printing. Free price.

Journal sells subscription.

Printing house of the Publishing house

MISI – MGSU

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

EDITOR-IN-CHIEF:

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

DEPUTY EDITOR-IN-CHIEF:

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

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

EDITORIAL BOARD:

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

Признаки взрывобезопасности пыли полимера, вспучивающегося при нагревании

Николай Львович Полетаев ✉

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. Знание максимального размера d_{cr} частиц, активно участвующих в процессе горения аэрозвеси, позволяет без огневых испытаний произвести классификацию отобранных на производстве дисперсных материалов по опасности взрыва. Для легковоспламеняющихся полимеров, в частности полиэтилена, $d_{cr} \approx (150 \pm 50)$ мкм (Hertzberg et al., 1982). При наличии в составе такого полимера вспучивающегося компонента, кратно увеличивающего размер частиц при нагревании (далее — вспучивающегося полимера), оценку его взрывоопасности вынуждены проводить экспериментально, обращая особое внимание на анализ правомерности полученных выводов.

Особенности объекта анализа. Рассмотрен вспучивающийся полимер, пыль которого по результатам стандартного исследования в 18,7-литровой камере была отнесена к взрывоопасной с максимальным давлением взрыва около 600 кПа. Сомнение в правомерности такого вывода обусловлено необходимостью двукратного увеличения энергии источника зажигания (до 5 кДж) для возбуждения взрыва аэрозвеси полимера.

Признаки взрывобезопасности и обсуждение результатов. Тщательный анализ результатов исследования вспучивающегося полимера выявил две особенности: случайное проявление взрывоопасности аэрозвеси в широком диапазоне концентрации пыли и наличие двух перегибов на восходящем участке зависимости давления во взрывной камере от времени в единичных опытах. Эти особенности по своим основным параметрам совпали с теми, что встречаются у антрацита и меламина, проявляющих взрывоопасность при испытаниях в 20-литровой камере, но взрывобезопасных по результатам крупномасштабных испытаний в камере объемом 1 м^3 с источником зажигания 10 кДж.

Выводы. Взрывоопасность рассматриваемой пыли вспучивающегося полимера в нормальных атмосферных условиях маловероятна. Взрывы в 18,7-литровой камере вызваны первоначальным нагревом аэрозвеси теплом горящего источника зажигания и частичного выгорания пыли. Окончательное заключение следует сделать на основании крупномасштабных испытаний.

Ключевые слова: взрыв пыли; 20-литровая камера; завышение опасности; ошибка тестирования

Для цитирования: Полетаев Н.Л. Признаки взрывобезопасности пыли полимера, вспучивающегося при нагревании // Пожаровзрывобезопасность/Fire and Explosion Safety. 2025. Т. 34. № 6. С. 5–11. DOI: 10.22227/0869-7493.2025.34.06.5-11

✉ Полетаев Николай Львович, e-mail: nlpvniipo@mail.ru

Signs of explosion safety of polymer dust that swells when heated

Nikolay L. Poletaev ✉

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. Knowledge the maximum size of the d_{cr} particles actively involved in the combustion of dust/air mixture makes it possible to classify the dispersed materials selected in the production according to the explosion hazard without fire tests. For flammable polymers, in particular polyethylene, $d_{cr} \approx (150 \pm 50)$ microns (Hertzberg et al., 1982). If such a polymer contains a bulging component that multiplies the particle size when heated (hereinafter referred to as the bulging polymer), its explosion hazard must be assessed experimentally, paying special attention to the analysis of the validity of the conclusions obtained.

Features of the object of analysis. A bulging polymer is considered, the dust of which, according to the results of a standard study in an 18.7-liter chamber, was classified as explosive with a maximum explosion pressure of about 600 kPa. The doubt about the validity of this conclusion is due to the need to double the energy of the ignition source (up to 5 kJ) to initiate an explosion of the polymer air suspension.

Signs of explosion safety and discussion of the results. A thorough analysis of the results of the study of a bulging polymer revealed two features: the accidental occurrence of explosive air suspension in a wide range of dust concentrations and the presence of two inflection points in the ascending section of the pressure dependence in the blast chamber on time in single experiments. These features, in their main parameters, coincided with those found in anthracite and melamine, which exhibit explosive properties when tested in a 20-liter chamber, but are nonexplosive according to the results of large-scale tests in a 1 m³ chamber with an ignition source of 10 kJ.

Conclusions. The explosion hazard of the considered dust of a bulging polymer is unlikely under normal atmospheric conditions. The explosions in the 18.7-liter test chamber are caused by the initial heating of the air suspension by the heat of the burning ignition source and partial dust burning in the chamber. The final conclusion should be made based on large-scale tests.

Keywords: dust explosion; 20-liter chamber; overdrive effect; testing error

For citation: Poletaev N.L. Signs of explosion safety of polymer dust that swells when heated. *Pozharovzryvobezopasnost/Fire and Explosion Safety*. 2025; 34(6):5-11. DOI: 10.22227/0869-7493.2025.34.06.5-11 (rus).

✉ Nikolay Lvovich Poletaev, e-mail: nlpvniipo@mail.ru

Введение

Известно, что при определенной степени измельчения твердого горючего материала образуется мелкодисперсная пыль, способная в присутствии воздуха (газообразного окислителя) проявлять взрывоопасность [1]. Последняя выражается в том, что пыль в состоянии аэрозвеси распространяет пламя, которое по внешнему виду и возможным катастрофическим последствиям аналогично хорошо известному пламени горючих газозводушных смесей [2].

Важнейшей характеристикой взрывоопасной пыли является максимальный размер частиц d_{cr} , активно участвующих в процессе горения аэрозвеси [3]. Если размер частиц дисперсного материала превышает d_{cr} , пламя по аэрозвеси такого материала не распространяется. Величина d_{cr} зависит, в первую очередь, от химического состава горючего материала, изменяясь в широких пределах от субмикронных значений для ядерного углерода [4] до миллиметровых размеров для сухой молочной сыворотки [5].

Надежное по своим выводам экспериментальное исследование взрывоопасности пыли проводится в крупномасштабном оборудовании [6], являясь продолжительным и затратным (для заказчика работы) процессом. В то же время знание d_{cr} позволяет без огневых испытаний произвести предварительную классификацию отобранных на производстве дисперсных материалов на взрывоопасность, что приводит к существенной экономии времени и финансовых средств. В частности, известно, что для пыли органических полимеров, например полиэтилена, величина d_{cr} занимает интервал значений от 100 до 200 мкм [7], а нижний концентрационный предел распространения пламени для таких дисперсных материалов с размером частиц менее d_{cr} составляет величину от 30 до 60 г/м³ [8].

Тем не менее существует обстоятельство, которое не позволяет воспользоваться упомянутой выше

оценкой d_{cr} для пыли из горючих полимерных материалов и вынуждает проводить экспериментальное исследование. Этим обстоятельством является присутствие в составе дисперсного полимерного компонента, вспучивающегося при нагревании. Частицы такого материала (далее — вспучивающегося полимера) в пламени увеличивают свой габаритный размер, оставляя открытым ответ на вопрос о фактической дисперсности исследуемого образца в волне горения. Данный пробел знаний предполагает повышенное внимание к проведению стандартных исследований дисперсного материала для исключения ошибки при интерпретации полученных экспериментальных результатов [9, 10].

В настоящей работе приводится пример, как тщательный анализ результата стандартной оценки взрывоопасности образца вспучивающегося полимера, отнесенного к взрывоопасным материалам в состоянии аэрозвеси, привел к серьезным сомнениям в обоснованности вывода стандартного исследования.

Особенности объекта анализа

Исследованная ранее пыль вспучивающегося полимера обладала следующими особенностями (сведения получены от В.В. Вдовиной и М.О. Девликанова), отличающими результаты ее стандартных исследований от среднестатистических результатов для полимеров. Здесь и далее подразумеваем методы исследования, изложенные в ГОСТ 12.1.044–89 ССБТ¹.

При равномерном прогреве исследованного полимера в печи прибора ОТП в условиях монотонного подъема температуры наблюдалось вспучивание поли-

¹ ГОСТ 12.1.044–89. ССБТ. Пожаровзрывоопасность веществ и материалов. Номенклатура показателей и методы их определения.

мера при достижении температуры 180 °С. При дальнейшем повышении температуры характерный размер вспученного образца мог в несколько раз превосходить первоначальный размер, что затрудняло определение температуры воспламенения (около 240 °С) и температуры самовоспламенения (около 490 °С) полимера.

При исследовании показателей взрывоопасности аэрозвеси вспучивающегося полимера обнаружилось, что низкокалорийные источники зажигания не приводили к взрыву аэрозвеси. Взрыв аэрозвеси вспучивающегося полимера наблюдался, начиная с двукратного превышения стандартного значения энергии (2,5 кДж) пиротехнического источника зажигания, а именно при энергии источника зажигания $E_{ig} = 5$ кДж.

Значение нижнего концентрационного предела распространения пламени по аэрозвеси (НКПР) было заметно высоким (250 г/м³). Эту величину показателя можно было объяснить низким содержанием потенциально взрывоопасной фракции полимера с размером частиц менее 160 мкм, которое составляло $R = 20$ мас. %. Действительно, расчетное значение показателя НКПР $\cdot R = 50$ г/м³ соответствует среднестатистическому значению показателя для мелкодисперсного полимера с размером частиц менее d_{cr} .

Максимальное давление взрыва P_{max} и индекс пожаровзрывоопасности K_{st} вспучивающегося полимера в 18,7-литровой квазисферической камере имели заниженные значения: 5 и 8 бар/(с·м) соответственно.

Последняя из перечисленных особенностей представляла формальное основание для опасений по поводу правомерности отнесения вспучивающегося полимера к взрывоопасным материалам в состоянии аэрозвеси. Действительно, низкое значение индекса пожаровзрывоопасности образца полимера при зажигании аэрозвеси энергоемким пиротехническим зарядом (5 кДж) оказалось в диапазоне «менее 45 бар/(с·м)», что, по мнению авторов работы [11], должно вызывать сомнение в возможности подтвердить взрывоопасность образца в крупномасштабных испытаниях с использованием взрывной камеры объемом 1 м³, в которой применяют пиротехнический источник зажигания с $E_{ig} = 10$ кДж.

Для подтверждения высказанных опасений ниже отмечается очевидное сходство некоторых особенностей результатов маломасштабного исследования взрывоопасности вспучивающегося полимера с особенностями результатов исследования двух горючих мелкодисперсных материалов (антрацита и меламина), проявляющих взрывоопасность при исследовании в 20-литровой взрывной камере, но признанных невзрывоопасными по результатам исследования в 1-м³ взрывной камере. Данные особенности будем называть признаками взрывобезопасности.

Признаки взрывобезопасности

Случайное проявление взрывоопасности аэрозвеси в широком диапазоне концентрации пыли

Для вспучивающегося полимера это явление наблюдалось в диапазоне концентрации пыли от 250 до 900 г/м³, о чем свидетельствуют данные, представленные на рис. 1. Разрыв между максимальными значениями регистрируемого давления в камере для представленных на рисунке двух совокупностей опытов составил от 200 до 350 кПа.

Это явление в части масштаба диапазона концентраций, для которого характерно наличие неоднозначной (двух ветвей) зависимости $P(C_s)$, и характерной величины разрыва между этими ветвями аналогично явлению, которое наблюдалось для пыли антрацита [12]. Пыль антрацита проявляла взрывоопасность при исследовании в сферической 20-литровой взрывной камере Р. Сивека, но не проявляла взрывоопасность в крупномасштабных огневых испытаниях

При оформлении результатов исследования вспучивающегося полимера опыты, отвечающие кривой 1 для концентраций пыли, превышающих 250 г/м³, рассматривались экспериментатором как ошибки эксперимента и не включались в протокол стандартного исследования. В отсутствие информации о таких опытах график зависимости $P(C_s)$ имел характерный

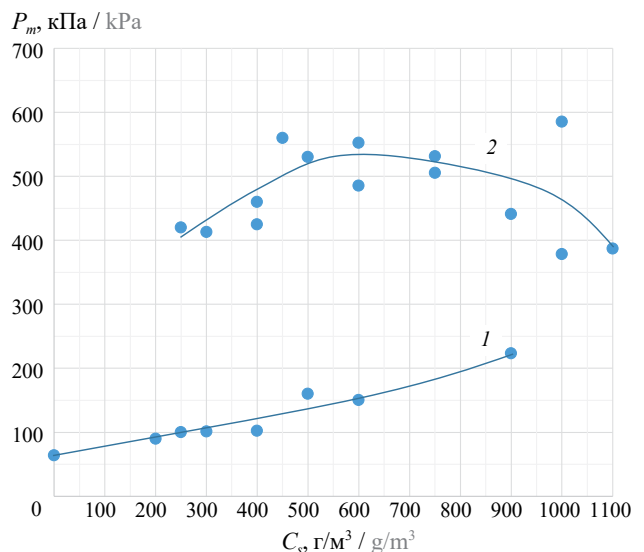


Рис. 1. Дискретная зависимость максимального избыточного давления P_m , кПа, в 18,7-литровой взрывной камере от концентрации аэрозвеси вспучивающегося полимера C_s , г/м³, и ее аппроксимация для опытов со взрывом (кривая 2) и без взрыва (кривая 1); ● — экспериментальные данные; энергия зажигания — 5 кДж

Fig. 1. Discrete dependence of the maximum overpressure P_m , kPa, in an 18.7-liter blast chamber on the concentration of the air suspension of the bulging polymer C_s , g/m³, and its approximation for experiments with an explosion (curve 2) and without an explosion (curve 1); ● — experimental data; ignition energy — 5 kJ

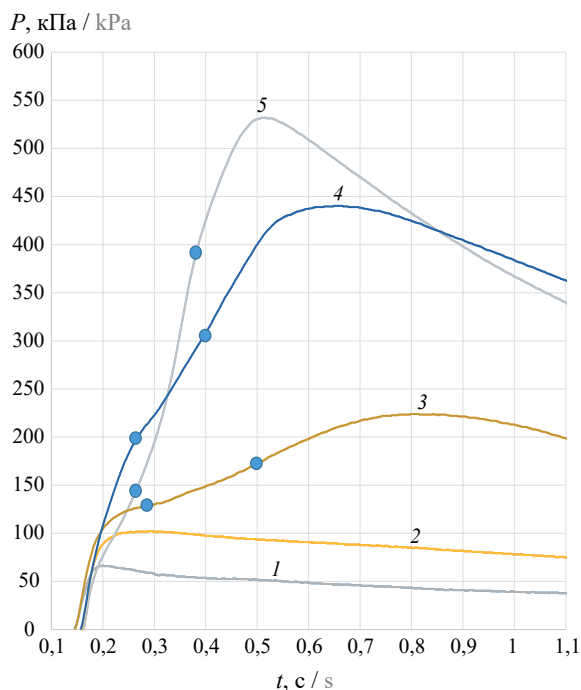


Рис. 2. Зависимости избыточного давления P , кПа, во взрывной камере от времени t , с, в единичных опытах. Жирными точками отмечены перегибы данных зависимостей

Fig. 2. Dependences of the excess pressure P , kPa, in the blast chamber on the time t , s, in single experiments. The inflections of these dependences are marked with bold dots

(однозначный) вид, типичный для взрывоопасной пыли.

Наличие двух перегибов на восходящем участке зависимости избыточного давления от времени $P(t)$ в единичных опытах

На рис. 2 приводятся характерные графики данной зависимости для вспучивающегося полимера. График 1 отвечает давлению, возникающему при срабатывании источника зажигания в отсутствие пыли. Графики 2 и 3 отвечают начальным концентрациям пыли, соответственно, 200 и 900 г/м³ нижней ветви зависимости $P_m(C_s)$ на рис. 1. Графики 4 и 5 отвечают начальной концентрации пыли, соответственно, 900 и 500 г/м³ для верхней ветви зависимости $P_m(C_s)$ на рис. 1.

Отчетливо видны перегибы функций $P(t)$ на графиках 3, 4 и 5. Нижний и верхний перегибы отвечают соответственно точке перехода скорости изменения давления dP/dt от стадии снижения к стадии роста и точке обратного перехода. Наличие этих перегибов свидетельствует о двух последовательных стадиях развития горения аэровзвеси во взрывной камере. Первая стадия отвечает подготовке негорючей аэровзвеси к переходу в состояние горючей аэровзвеси вследствие нагрева взвеси при срабатывании источника зажигания и вызванного этим событием частичного выгорания пыли. Вторая ста-

дия отвечает выгоранию подготовленной горючей аэровзвеси.

Аналогичное поведение функций $P(t)$ наблюдалось для пыли антрацита и меламина [9]. Важно отметить, что данные пыли проявляли взрывоопасность при исследовании в сферической 20-литровой взрывной камере P . Сивека, но не проявляли взрывоопасность в крупномасштабных огневых испытаниях.

Обсуждение результатов

Представленные на рис. 1 результаты позволяют разделить все опыты с пылью вспучивающегося полимера на две группы по величине P . В первую группу входят опыты, группирующиеся вблизи кривой 1 на рис. 1. Во вторую группу входят опыты, группирующиеся вблизи кривой 2. Близость значений P к аппроксимирующим кривым внутри каждой из групп опытов (менее 70 кПа) и существенный разрыв между упомянутыми кривыми (более 200 кПа) демонстрируют качественное отличие процессов горения пыли в опытах из разных групп. Опыт первой группы выявляют локальное горение аэровзвеси вблизи пламени источника зажигания, т.е. отсутствие взрыва. Опыт второй группы выявляют взрыв пыли, охватывающий значительный объем аэровзвеси [10]. В то же время характер изменения аппроксимирующих кривых с ростом концентрации аэровзвеси C_s порождает уверенность в слиянии этих кривых в диапазоне значений C_s от 900 до 1200 г/м³. Там же находится верхний предел распространения пламени по аэровзвеси, которому отвечает $P \approx 330$ кПа [9]. По мере приближения к упомянутому диапазону значений C_s происходит размывание признаков принадлежности опыта к той или иной конкретной группе, что можно видеть на примере графиков $P(t)$ для $C_s = 900$ г/м³ (кривые 3 и 4 на рис. 2).

Отличие процессов горения для опытов из разных групп подтверждает различие восходящего участка зависимости $P(t)$. В опытах первой группы для этого участка $P(t)$ характерно монотонное снижение производной dP/dt , аналогичное тому, которое наблюдается в случае срабатывания источника зажигания при отсутствии пыли (см. опыт 1 на рис. 2). Для опытов второй группы на восходящем участке $P(t)$ присутствуют две точки перегиба (см. кривые 4 и 5 на рис. 2), исключающие монотонное изменение dP/dt и указывающие на двухэтапный характер горения пыли полимера. Нижний перегиб соответствует моменту достижения минимальной скорости изменения давления dP/dt , что является особенностью проявления эффекта «overdrive»: завершается этап медленного развития горения, на котором происходит прогрев свежей

аэровзвеси путем ее турбулентного перемешивания с продуктами горения источника зажигания [13]. Верхний перегиб относится к этапу быстрого развития взрыва и отвечает моменту достижения максимальной скорости изменения давления $(dP/dt)_{\max}$, нормированное значение которой K_{st} весьма мало (не более 8 бар·м/с) [10].

Диапазон взрывоопасных концентраций пыли полимера в использованных условиях тестирования (18,7-литровая камера, $E_{ig} = 5$ кДж) составил от 250 до 1100 г/м³. Во всем диапазоне взрывоопасных концентраций имеет место случайный характер проявления взрывоопасности пыли (рис. 1), который объясняется, по-видимому, следующими обстоятельствами:

- близостью габарита пламени источника зажигания и габарита камеры и разбросом (± 10 %) энергии, выделяющейся при горении источника зажигания [14];
- двухэтапным характером взрыва, включающим конкуренцию процессов, один из которых способствует росту горючести пыли (прогрев свежей аэровзвеси), а другой снижает способность нагретой зоны в камере к инициированию волны горения (из-за уменьшения максимальной температуры этой зоны) [15].

Проявление взрывоопасности вспучивающегося полимера при увеличении энергии источника зажигания до 5 кДж в настоящей работе вызвано ростом начальной температуры аэровзвеси из-за притока тепловой энергии от срабатывающего источника зажигания и инициированного этим событием локального выгорания пыли [10]. Оценим увеличение среднеобъемной температуры аэровзвеси в герметичной взрывной камере из-за упомянутого теплового воздействия, пренебрегая различием температур фаз аэровзвеси на начальной стадии огневого опыта и используя закон Шарля [16, 17]:

$$\frac{T + 273}{T_0 + 273} = \frac{P + 100}{P_0 + 100}, \quad (1)$$

где T , °С, — возросшая температура аэровзвеси, отвечающая возросшему избыточному давлению воздуха в камере P , кПа; полагаем $T_0 = 25$ °С, $P_0 = 0$ кПа;

T_0 , °С, и P_0 , кПа, — начальные значения температуры аэровзвеси и избыточного давления воздуха в камере соответственно.

Для случая срабатывания источника зажигания в отсутствие аэровзвеси (кривая 1 на рис. 2) имеем максимальное значение $P = 65$ кПа, которому, согласно формуле (1), отвечает значение $T \approx 220$ °С, близкое к температуре воспламенения вспучивающегося полимера. Это позволяет предположить, что при наличии в камере взвеси вспучивающегося полимера срабатывание источника зажигания может (с некоторой вероятностью) инициировать появление горючей смеси воздуха с газообразными продуктами деструкции полимера в значительной части объема камеры. В этом случае увеличенный размер частиц не будет препятствием для распространения пламени в среде, представляющей, фактически, гибридную смесь [18–20].

Согласно графикам на рис. 2, «расщепление» зависимостей $P(t)$ на две группы («взрыв есть» и «взрыва нет») происходит вблизи уровня давления $P_{cr} \approx 125$ кПа на момент $t \approx 0,3$ с. Превышение P_{cr} гарантирует результат «взрыв есть». Согласно формуле (1), значению P_{cr} соответствует среднеобъемная температура в камере $T \approx 400$ °С, отвечающая примерно равным вкладам в начальный прогрев аэровзвеси от источника зажигания и локального выгорания пыли.

Выводы

Взрывоопасность аэровзвеси рассмотренного образца пыли вспучивающегося полимера в нормальных атмосферных условиях маловероятна. Взрывы в испытательной камере, скорее всего, вызваны первоначальным нагревом аэровзвеси вспучивающегося полимера теплом горящего источника зажигания и теплом инициированного этим событием частичного выгорания пыли. Окончательное заключение о взрывоопасности вспучивающегося полимера следует сделать на основании крупномасштабного исследования в камере объемом 1 м³ с источником зажигания, имеющим запас химической энергии, равный 10 кДж [1].

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. *Eckhoff R.K.* Dust explosions in the process industries. 3rd edition // Gulf Professional Publishing/Elsevier. Boston, 2003. 719 p. DOI: 10.1016/B978-075067602-1/50012-3
2. *Тетерин И.А., Копылов П.С., Копылов С.Н., Леончук П.А.* Методика определения давления взрыва газозвушного облака при выбросе сжиженного природного газа в открытое пространство // Горение и взрыв. 2025. № 18 (2–47). С. 30–40. DOI: 10.30826/CE25180204. EDN GXHGGP.
3. *Полетаев Н.Л.* Максимальный размер взрывоопасных частиц аэровзвеси железа // Пожаровзрывобезопасность/Fire and Explosion Safety. 2024. № 33 (3). С. 5–10. DOI: 10.22227/0869-7493.2024.33.03.5-10. EDN ZOEVPA.

4. Поletaев Н.Л. Оценка взрывоопасности ядерного графита в 1-м³ камере // Пожаровзрывобезопасность/Fire and Explosion Safety. 2022. № 31 (2). С. 15–21. DOI: 10.22227/0869-7493.2022.31.02.15-21. EDN XHNOXH.
5. Поletaев Н.Л. Взрывоопасность аэрозвеси сухой молочной сыворотки // Пожаровзрывобезопасность/Fire and Explosion Safety. 2023. № 32 (1). С. 51–56. DOI: 10.22227/0869-7493.2023.32.01.51-56. EDN UGDHRZ.
6. Bartknecht W. Explosionen, Ablauf und Schutzmaßnahmen. Berlin, Springer-Verlag, 1980. 264 p. URL: https://rusneb.ru/catalog/000200_000018_RU_NLR_INFOCOMM_116_5000063735/
7. Hertzberg M., Cashdollar K.L., Ng D.L., Conti R.S. Domains of flammability and thermal ignitability for pulverized coals and other dusts: Particle size dependences and microscopic residue analyses // Symposium (International) on Combustion. 1982. No. 19 (1). Pp. 1169–1180. DOI: 10.1016/s0082-0784(82)80293-2
8. Баратов А.Н., Корольченко А.Я., Кравчук Г.Н. Пожаровзрывоопасность веществ и материалов и средства их тушения : справоч. в 2 кн.; кн. 2. М. : Химия, 1990. 384 с. EDN UXZQDH.
9. Поletaев Н.Л. Критерии взрывоопасности аэрозвеси // Пожарная безопасность. 2018. № 3. С. 49–60. EDN XYUTLV.
10. Поletaев Н.Л., Сазонов М.С., Контев М.Ю. Исследование взрывоопасности аэрозвеси свинца // Пожаровзрывобезопасность/Fire and Explosion Safety. 2024. № 33 (4). С. 5–12. DOI: 10.22227/0869-7493.2024.33.04.5-12. EDN ONWNUS.
11. Proust Ch., Accorsi A., Dupont L. Measuring the violence of dust explosions with the “20 l sphere” and with the standard “ISO 1 m³ vessel”. Systematic comparison and analysis of the discrepancies // Journal of Loss Prevention in the Process Industries. 2007. No. 20 (4–6). Pp. 599–606. DOI: 10.1016/j.jlp.2007.04.032
12. Поletaев Н.Л., Сазонов М.С., Контев М.Ю. Особенности взрыва антрацита в 20-л камере // Пожаровзрывобезопасность/Fire and Explosion Safety. 2024. № 33 (2). С. 23–31. DOI: 10.22227/0869-7493.2024.33.02.23-31. EDN PYWDOT.
13. Portarapillo M., Sanchirico R., Di Benedetto A. On the pyrotechnic ignitors role in dust explosion testing: Comparison between 20 L and 1 m³ explosion vessels // Process Safety Progress. 2021. No. 40 (4). Pp. 289–295. DOI: 10.1002/prs.12249. EDN PZFPTL.
14. Krietsch A., Scheid M. Test on suitability of a new pyrotechnical igniter for determination of explosion characteristics of dust clouds in 20-l-sphere and 1-m³-vessel // Science and Technology Energetic Materials. 2011. No. 72 (6). Pp. 174–178. URL: tem/Vol.72/No.6.04.html
15. Cashdollar K.L., Chatrathi K. Minimum Explosible Dust Concentrations Measured in 20-L and 1-m³ Chambers // Combustion Science and Technology. 1993. No. 87 (1–6). Pp. 157–171. DOI: 10.1080/00102209208947213
16. Ландсберг Г.С. Элементарный учебник физики. М. : Наука, 1967. Т. I. С. 414. 576 с. URL: https://archive.org/details/B-001-038-324-ALL/Landsberg_I/
17. Dramićanin M. Luminescence Thermometry. Methods, Materials, and Applications. Chap. 1. Introduction to Measurements of Temperature. 2018. Pp. 1–12. DOI: 10.1016/B978-0-08-102029-6.00001-4
18. Taveau J.R., Going J.E., Hochgreb S., Lemkowitz S.M., Roekaerts D.J.E.M. Igniter-induced hybrids in the 20-l sphere // Journal of Loss Prevention in the Process Industries. 2017. No. 49 (8). Pp. 348–356. DOI: 10.1016/j.jlp.2017.07.014
19. Addai E.K., Clouthier M., Amyotte P., Safdar M., Krause U. Experimental investigation of limiting oxygen concentration of hybrid mixtures // Journal of Loss Prevention Process Industries. 2019. No. 57. Pp. 120–130. DOI: 10.1016/j.jlp.2018.11.016
20. Friedrichova R., Karl J., Janovsky B. Preconditioning of Dust and Fluid in a 20 L Chamber During Ignition by a Chemical Ignitor // Fire. 2025. No. 8 (9). P. 336. DOI: 10.3390/fire8090336

REFERENCES

1. Eckhoff R.K. Dust explosions in the process industries. 3rd edition. Gulf Professional Publishing/Elsevier. Boston, 2003; 720. DOI: 10.1016/B978-075067602-1/50012-3
2. Teterin I.A., Kopylov P.S., Kopylov S.N., Leonchuk P.A. Method for determining the explosion pressure of a gas-air cloud during the release of liquefied natural gas into open space. *Combustion and Explosion*. 2025; 18(2-47):30-40. DOI: 10.30826/CE25180204. EDN GXHGGP. (rus).
3. Poletaev N.L. Maximum explosive particles size of iron air suspension. *Pozharovzryvobezopasnost/Fire and Explosion Safety*. 2024; 33(3):5-10. DOI: 10.22227/0869-7493.2024.33.03.5-10. EDN ZOEVPA. (rus).
4. Poletaev N.L. Explosibility of nuclear graphite measured in a 1 m³ chamber. *Pozharovzryvobezopasnost/Fire and Explosion Safety*. 2022; 31(2):15-21. DOI: 10.22227/0869-7493.2022.31.02.15-21. EDN XHNOXH. (rus).
5. Poletaev N.L. Explosion hazard of whey powder mixed with air. *Pozharovzryvobezopasnost/Fire and Explosion Safety*. 2023; 32(1):51-56. DOI: 10.22227/0869-7493.2023.32.01.51-56. EDN UGDHRZ. (rus).

6. Bartknecht W. *Explosionen, Ablauf und Schutzmaßnahmen*. Berlin, Springer-Verlag, 1980; 259. URL: https://rusneb.ru/catalog/000200_000018_RU_NLR_INFOCOMM_116_5000063735/
7. Hertzberg M., Cashdollar K.L., Ng D.L., Conti R.S. Domains of flammability and thermal ignitability for pulverized coals and other dusts: Particle size dependences and microscopic residue analyses. *Symposium (International) on Combustion*. 1982; 19(1):1169-1180. DOI: 10.1016/s0082-0784(82)80293-2
8. Baratov A.N., Korolchenko A.Ya., Kravchuk G.N. Fire and explosion hazard of substances and materials and their extinguishing means : *handbook in 2 vol. Book 2*. Moscow, Khimiya, 1990. EDN UXZQDH. (rus).
9. Poletaev N.L. About criterion of dust explosibility. *Fire Safety*. 2018; 3:49-60. EDN XYUTLV. (rus).
10. Poletaev N.L., Sazonov M.S., Koptev M.Yu. Explosion hazard study of lead dust/air mixture. *Pozharovzryvbezopasnost/ Fire and Explosion Safety*. 2024; 33(4):5-12. DOI: 10.22227/0869-7493.2024.33.04.5-12. EDN ONWNUS. (rus).
11. Proust Ch., Accorsi A., Dupont L. Measuring the violence of dust explosions with the “20 l sphere” and with the standard “ISO 1 m³ vessel”. Systematic comparison and analysis of the discrepancies. *Journal of Loss Prevention in the Process Industries*. 2007; 20(4-6):599-606. DOI: 10.1016/j.jlp.2007.04.032
12. Poletaev N.L., Sazonov M.S., Koptev M.Yu. Anthracite dust explosion specificities in 20 L chamber. *Pozharovzryvbezopasnost/Fire and Explosion Safety*. 2024; 33(2):23-31. DOI: 10.22227/0869-7493.2024.33.02.23-31. EDN PYWDOT. (rus).
13. Portarapillo M., Sanchirico R., Di Benedetto A. On the pyrotechnic igniters role in dust explosion testing: Comparison between 20 L and 1 m³ explosion vessels. *Process Safety Progress*. 2021; 40(4):289-295. DOI: 10.1002/prs.12249. EDN PZFPTL.
14. Krietsch A., Scheid M. Test on suitability of a new pyrotechnical igniter for determination of explosion characteristics of dust clouds in 20-l-sphere and 1-m³-vessel. *Science and Technology Energetic Materials*. 2011; 72(6):174-178. URL: tem/Vol.72/No.6.04.html
15. Cashdollar K.L., Chatrathi K. Minimum Explosible Dust Concentrations Measured in 20-L and 1-m³ Chambers. *Combustion Science and Technology*. 1993; 87(1-6):157-171. DOI: 10.1080/00102209208947213
16. Landsberg G.S. *Elementary Textbook of Physics*. Moscow, Nauka, 1967; I(414):576. URL: https://archive.org/details/B-001-038-324-ALL/Landsberg_I/ (rus).
17. Dramićanin M. *Luminescence Thermometry. Methods, Materials, and Applications. Chap. 1. Introduction to Measurements of Temperature*. 2018; 1-12. DOI: 10.1016/B978-0-08-102029-6.00001-4
18. Taveau J.R., Going J.E., Hochgreb S., Lemkowitz S.M., Roekaerts D.J.E.M. Igniter-induced hybrids in the 20-l sphere. *Journal of Loss Prevention Process Industries*. 2017; 49:348-356. DOI: 10.1016/j.jlp.2017.07.014
19. Addai E.K., Clouthier M., Amyotte P., Safdar M., Krause U. Experimental investigation of limiting oxygen concentration of hybrid mixtures. *Journal of Loss Prevention Process Industries*. 2019; 57:120-130. DOI: 10.1016/j.jlp.2018.11.016
20. Friedrichova R., Karl J., Janovsky B. Preconditioning of Dust and Fluid in a 20 L Chamber During Ignition by a Chemical Ignitor. *Fire*. 2025; 8(9):336; DOI: 10.3390/fire8090336

Поступила 16.09.2025, после доработки 20.10.2025;

принята к публикации 21.10.2025

Received September 16, 2025; Received in revised form October 20, 2025;

Accepted October 21, 2025

Информация об авторе

ПОЛЕТАЕВ Николай Львович, д.т.н., ведущий научный сотрудник, Всероссийский ордена «Знак Почета» научно-исследовательский институт противопожарной обороны Министерства Российской Федерации по делам гражданской обороны, чрезвычайным ситуациям и ликвидации последствий стихийных бедствий, Россия, 143903, Московская обл., г. Балашиха, мкр. ВНИИПО, 12; РИНЦ ID: 1093620; ORCID: 0000-0003-2586-8597; e-mail: nlpvniipo@mail.ru

Information about the author

Nikolay L. POLETAEV, Dr. Sci. (Eng.), Leading Researcher, All-Russian Research Institute for Fire Protection of Ministry of Russian Federation for Civil Defense, Emergencies and Elimination of Consequences of Natural Disasters, VNIPO, 12, Balashikha, Moscow Region, 143903, Russian Federation; ID RSCI: 1093620; ORCID: 0000-0003-2586-8597; e-mail: nlpvniipo@mail.ru

Новые данные по токсичности продуктов терморазложения изоляции не распространяющих горение кабелей

Сергей Викторович Пузач , Ольга Сергеевна Лебедченко, Руслан Гянджавиевич Акперов

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

АННОТАЦИЯ

Введение. Экспериментальные исследования токсичности продуктов терморазложения изоляции электрических кабелей, не распространяющих горение, являются актуальными из-за отсутствия величин удельных коэффициентов образования токсичных газов, необходимых для проведения пожарно-технических расчетов.

Цели и задачи. Целью статьи является получение новых экспериментальных данных по удельным коэффициентам образования расширенного перечня токсичных газов, образующихся при терморазложении изоляции кабелей, не распространяющих горение.

Для достижения поставленной цели были проведены эксперименты в маломасштабной опытной установке для определения пожарной опасности конденсированных материалов в случае термического разложения электрического кабеля конструкции КВВГнг(A)-LS 4 × 1,5.

Методы. Измерение парциальных плотностей токсичных газов и кислорода, а также удельной массовой скорости выгорания образцов кабеля в маломасштабной опытной установке. Обработка экспериментальных данных и анализ полученных результатов.

Результаты и их обсуждение. Обнаружено, что при терморазложении испытываемых образцов кабеля образуется смесь токсичных газов (монооксид и диоксид углерода, хлористый водород, циановодород, фосген, диоксид азота и акролеин), которая не учитывается при проведении пожарно-технических расчетов.

Получены зависимости от времени испытаний парциальных плотностей кислорода и вышеуказанных токсичных газов, удельного коэффициента поглощения кислорода и удельных коэффициентов образования токсикантов, а также удельной массовой скорости выгорания образцов.

Для учета масштабного фактора (отличие размеров маломасштабной экспериментальной установки и реального помещения) получены зависимости парциальных плотностей токсичных газов от изменения парциальной плотности кислорода в табличном виде.

Анализ полученных результатов показал, что парциальные плотности токсичных газов превышают или соизмеримы с их критическими значениями для человека.

Заключение. Полученные новые экспериментальные данные по удельным коэффициентам образования вышеуказанных токсичных газов могут быть использованы при расчете пожарных рисков в помещениях, где используются или производятся кабели, не распространяющие горение.

Ключевые слова: температурный режим; токсичные газы; парциальная плотность; удельные коэффициенты образования токсичных газов; критическая концентрация

Для цитирования: Пузач С.В., Лебедченко О.С., Акперов Р.Г. Новые данные по токсичности продуктов терморазложения изоляции не распространяющих горение кабелей // Пожаровзрывобезопасность/Fire and Explosion Safety. 2025. Т. 34. № 6. С. 12–22. DOI: 10.22227/0869-7493.2025.34.06.12-22

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

New data on the toxicity of thermal decomposition products from flame-retardant cable insulation

Sergey V. Puzach , Olga S. Lebedchenko, Ruslan G. Akperov

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

ABSTRACT

Introduction. Experimental studies of the toxicity of the thermal decomposition products of the insulation of non-combustible electrical cables are relevant due to the lack of specific coefficients for the formation of toxic gases, which are necessary for fire-technical calculations.

Goals and objectives. The purpose of the paper is to obtain new experimental data on the specific coefficients of formation of an extended list of toxic gases that are formed during the thermal decomposition of the insulation of non-combustible cables. To achieve this goal, experiments were conducted in a small-scale experimental setup to determine the fire hazard of condensed materials in the case of thermal decomposition of the KVVNg(A)-LS 4 × 1.5 electric cable.

Methods. Measurement of the partial densities of toxic gases and oxygen, as well as the specific mass burn-out rate of cable specimens in a small-scale pilot plant. Processing of experimental data and analysis of the obtained results.

Results and discussion. It was found that during the thermal decomposition of the cable specimens under test, a mixture of toxic gases (carbon monoxide and dioxide, hydrogen chloride, hydrogen cyanide, phosgene, nitrogen dioxide, and acrolein) is formed, which is not taken into account in fire-technical calculations.

The dependence of the partial densities of oxygen and the above-mentioned toxic gases, the specific absorption coefficient of oxygen, and the specific formation coefficients of toxicants, as well as the specific mass rate of combustion of the specimens, on the test time was obtained.

To account for the scale factor (the difference in size between the small-scale experimental setup and the real room), the partial densities of toxic gases were plotted against the change in partial density of oxygen.

The analysis of the results showed that the partial densities of toxic gases exceeded or were comparable to their critical values for humans.

Conclusion. The new experimental data on the specific coefficients of formation of the above-mentioned toxic gases can be used in the calculation of fire risks in rooms where non-combustible cables are used or manufactured.

Keywords: temperature conditions; toxic gases; partial density; specific coefficients of formation of toxic gases; critical concentration

For citation: Puzach S.V., Lebedchenko O.S., Akperov R.G. New data on the toxicity of thermal decomposition products from flame-retardant cable insulation. *Пожаровзрывобезопасность/Fire and Explosion Safety*. 2025; 34(6):12-22. DOI: 10.22227/0869-7493.2025.34.06.12-22 (rus).

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

Введение

В соответствии с указом Президента Российской Федерации¹ и приказом МЧС России² необходимо проводить пожарно-технические расчеты с учетом новых научно-технических достижений, позволяющих с большей достоверностью определять теплофизические и химические показатели для современных материалов, а также получать теплофизические и химические показатели современных веществ и материалов, необходимые для пожарно-технических расчетов [1–3].

В настоящее время широкое использование получили электрические кабели, не распространяющие горение (кабели НГ) [4, 5]. Нераспространение горения обеспечивается наличием в составе изоляционного материала кабелей веществ класса антипиренов. Изменение химического состава изоляционного материала приводит к тому, что теплофизические свойства горючей нагрузки «кабели НГ» существенно отличаются от теплофизических свойств кабелей, распространяющих горение (кабели РГ) [6–8]. Однако динамика развития пожара [9, 10] и токсикологическая обстановка на пожаре при горении кабелей НГ в помещениях при их производстве или использовании до настоя-

щего времени мало изучены [11, 12]. От состава изоляционных материалов зависит состав компонентов термической деструкции [13]. В настоящее время идет пересмотр острой ингаляционной токсичности монооксида углерода и цианистого водорода: сравнение моделей для решения проблемы летальности и выведения из строя в зависимости от концентрации и времени [14].

В работах [15, 16] представлены результаты экспериментальной оценки токсичности продуктов горения некоторых видов кабелей НГ. Исследуемый состав продуктов горения был ограничен только двумя высокотоксичными газами — монооксидом углерода и циановодородом.

Однако при терморазложении изоляции вышеуказанных кабелей состав токсичных продуктов горения гораздо шире [9–11] из-за ее химического состава.

Поэтому вопросы проведения экспериментальных исследований токсичности продуктов терморазложения изоляции кабелей НГ являются актуальными.

Актуальность и практическая значимость исследований пожароопасных свойств кабелей НГ также подтверждается происходящими крупными пожарами.

Например, 20 сентября 2024 г. в г. Подольске Московской области произошел пожар в здании кабельного завода³. На заводе АО «СПКБ Техно» производят огнестойкие кабели для систем охранно-

¹ Об утверждении Основ государственной политики Российской Федерации в области пожарной безопасности на период до 2030 года : Указ Президента РФ от 1 января 2018 г. № 2.

² Об утверждении методики определения расчетных величин пожарного риска на производственных объектах : Приказ МЧС России от 26 июня 2024 г. № 533.

³ URL: <https://aif.ru/incidents/ploshchad-pozhara-na-kabelnom-zavode-v-podolske-dostigla-4-8-tys-kv-metrov> (дата обращения: 27.06.2025).



a



b

Рис. 1. Пожар в здании кабельного завода: *a* — процесс тушения производственного корпуса⁴; *b* — вид развитой стадии пожара в производственном корпусе⁵

Fig. 1. Fire in a cable factory building: *a* — the process of extinguishing the production⁴; *b* — a view of the advanced stage of a fire in a production building⁵

пожарной сигнализации и безопасности телекоммуникаций. Площадь возгорания составила 4,8 тыс. м² (рис. 1). Огнем были охвачены третий и четвертый этажи, произошло обрушение кровли здания завода. Порядка 30 человек самостоятельно эвакуировались. Предварительно причиной пожара названо короткое замыкание в электросети^{4,5}.

Целью статьи является получение новых экспериментальных данных по удельным коэффициентам образования расширенного перечня токсичных газов, образующихся при терморазложении изоляции кабелей НГ, что необходимо для проведения пожарно-технических расчетов (например, определение времени блокирования путей эвакуации токсичными газами).

Для достижения поставленной цели были проведены эксперименты с определением для кабеля конструкции КВВГнг(А)-LS 4 × 1,5 при его терморазложении парциальных плотностей следующих токсичных газов: монооксид и диоксид углерода, хлористый водород, циановодород, фосген, диоксид азота, а также акролеин.

Методы

Использовался экспериментальный метод измерения парциальных плотностей токсичных газов и кислорода, а также удельной массовой скорости выгорания образцов кабеля в маломасштабной опытной установке.

Была проведена обработка экспериментальных данных и выполнен анализ полученных результатов.

⁴ URL: <https://www.pnp.ru/incident/v-podolske-gorit-zavod-na-ploshhadi-48-kvadratnykh-metrov.html> (дата обращения: 27.06.2025).

⁵ URL: <https://tvpodolsk.ru/news/incidents/v-podolske-tushat-krupnyy-pozhar/> (дата обращения: 27.06.2025).

Экспериментальная установка и методика проведения эксперимента

Экспериментальные исследования проведены на экспериментальной установке [16]⁶.

Система измерения концентраций токсичных газов, помимо использования многоканального автоматического проточного газоанализатора типа Dräger X-am 7000, в отличие от работ [15–17] подверглась модификации путем добавления в измерительный участок следующего газоаналитического оборудования (производитель ООО «НПО «ПРИБОР» ГАНК»): газоанализатор универсальный «ГАНК-4» и газоанализатор универсальный ЭКОЛОАБ Плюс. Это позволило расширить номенклатуру измеряемых газов по сравнению с работами [15–17].

При проведении испытаний измерялась масса образца (погрешность не более ± 1 мг) и парциальные плотности следующих газов: монооксид углерода (CO), диоксид углерода (CO₂), циановодород (HCN), кислород (O₂), хлороводород (HCl), фосген (COCl₂), акролеин (C₃H₄O), монооксид азота (NO), диоксид азота (NO₂).

Допустимые погрешности измерения парциальных плотностей газов не превышали 10 %.

Исходные данные для проведения экспериментов

Исследуемый кабель КВВГнг(А)-LS 4 × 1,5 предназначен для неподвижного присоединения к электрическим приборам, аппаратам, сборкам зажимов электрических распределительных устройств с номинальным переменным напряжением до 660 В частоты до 100 Гц или постоянным

⁶ Патент Российской Федерации на полезную модель № 174688. Заявка № 2017113747, приоритет полезной модели 20.04.2017 г. (дата государственной регистрации: 26.10.2017 г.).

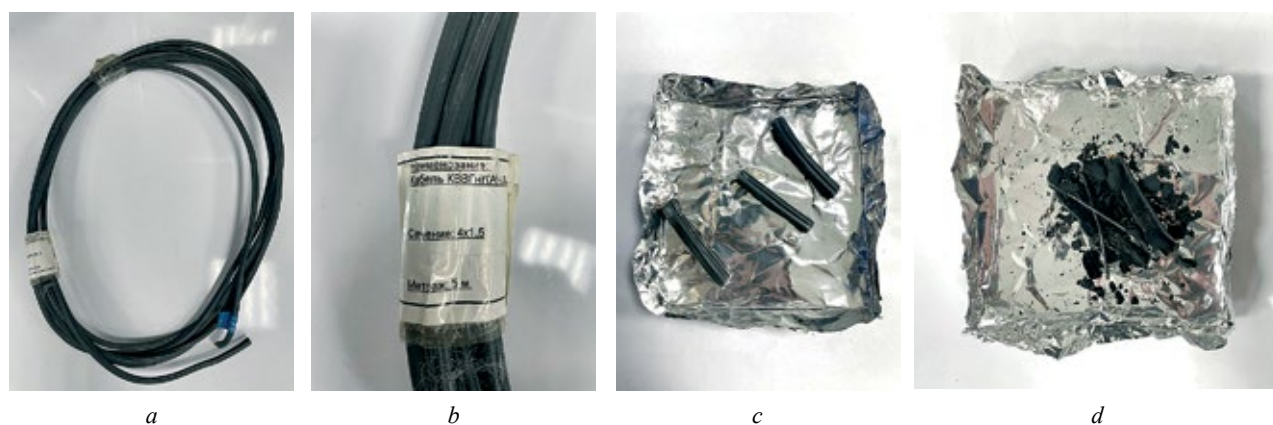


Рис. 2. Фотографии образцов кабеля конструкции КВВГнг(А)-LS 4 × 1,5 до и после испытаний

Fig. 2. Photos of specimens of KVVGng(A)-LS 4 × 1.5 cable before and after testing

напряжением до 1000 В. Кабель применяется для прокладки на открытом воздухе, в кабельных сооружениях и помещениях, в условиях агрессивной среды, при отсутствии механических воздействий, в том числе для использования в системах атомных электростанций. Имеет однопроволочную токопроводящую жилу круглой формы, изоляцию из поливинилхлоридной композиции пониженной пожарной опасности и оболочку из поливинилхлоридной композиции пониженной пожарной опасности⁷.

Фотографии образцов кабеля конструкции КВВГнг(А)-LS 4 × 1,5 представлены на рис. 2.

⁷ URL: https://cable.ru/cable/marka-kvvngng_a_ls_4x1_5.php#description (дата обращения: 23.06.2025).

Масса образцов кабелей составляла от 14 до 16 г и была подобрана таким образом, чтобы полученные значения концентрации газов в экспозиционной камере не выходили за максимальный предел измерения используемых газоанализаторов.

Результаты и их обсуждение

На рис. 3 и 4 представлены зависимости от времени испытаний парциальных плотностей кислорода и токсичных газов, образующихся при горении кабелей НГ. Количество кривых соответствует количеству проведенных экспериментов (каждому эксперименту соответствует свой цвет кривых).

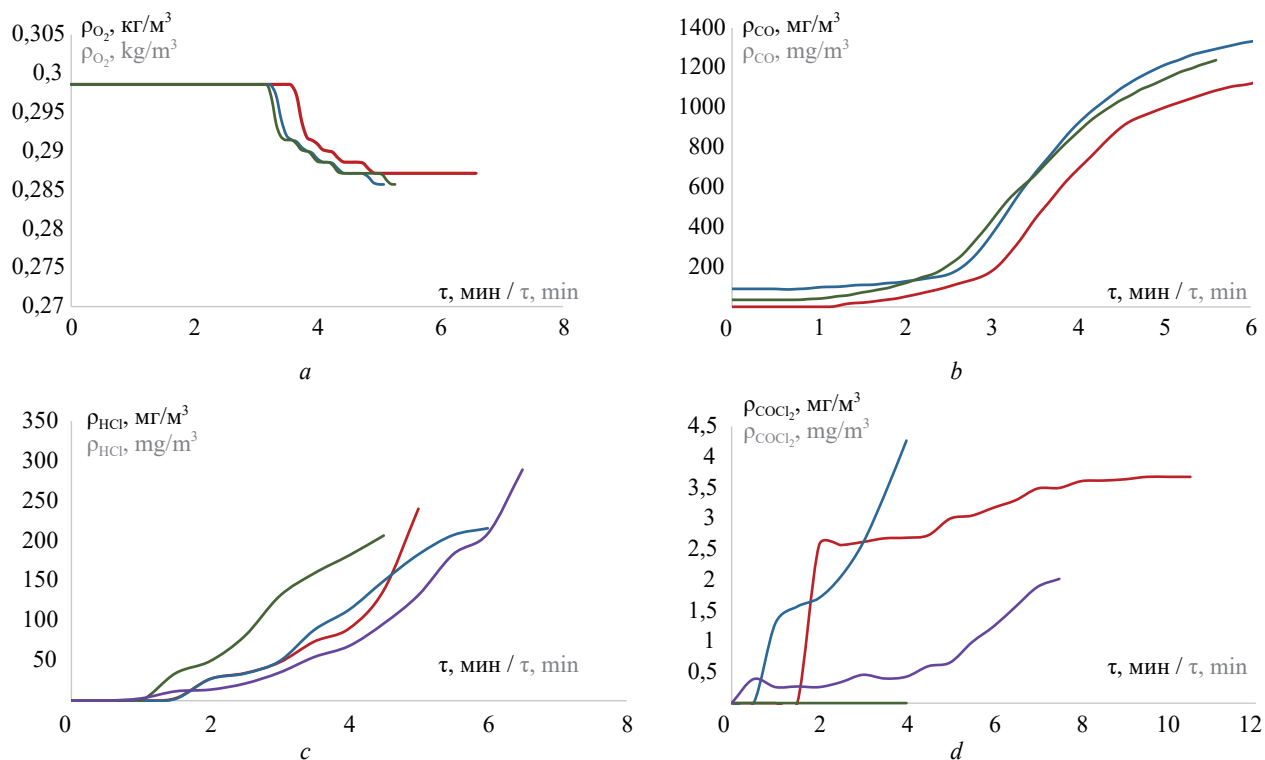


Рис. 3. Зависимости от времени парциальной плотности кислорода (а), оксида углерода (б), хлороводорода (с) и фосгена (d)
Fig. 3. Time dependences of the partial density of oxygen (a), carbon monoxide (b), hydrogen chloride (c), and phosgene (d)

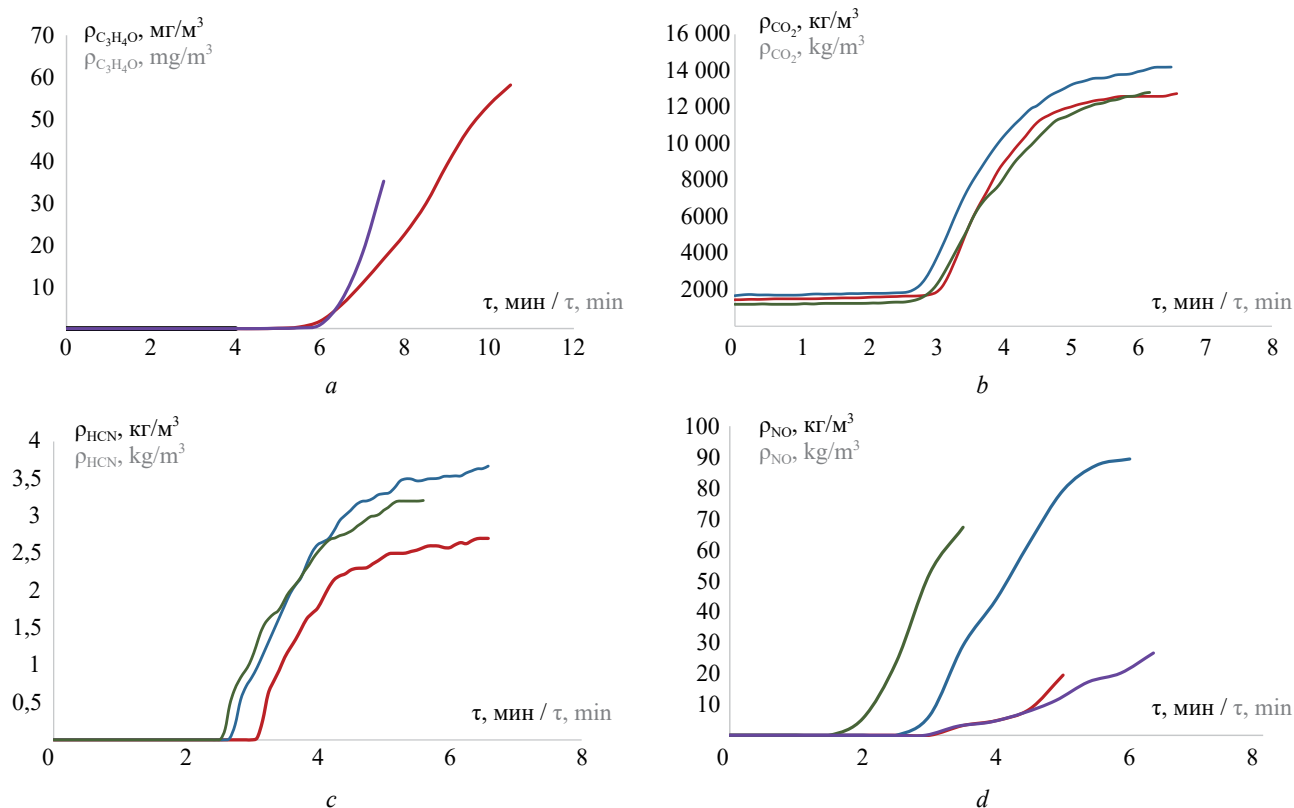


Рис. 4. Зависимости от времени парциальной плотности акролеина (а), двуоксида углерода (б), циановодорода (с) и монооксида азота (д)

Fig. 4. Time dependences of the partial density of acrolein (a), carbon dioxide (b), and hydrogen cyanide (c) and nitrogen monoxide (d)

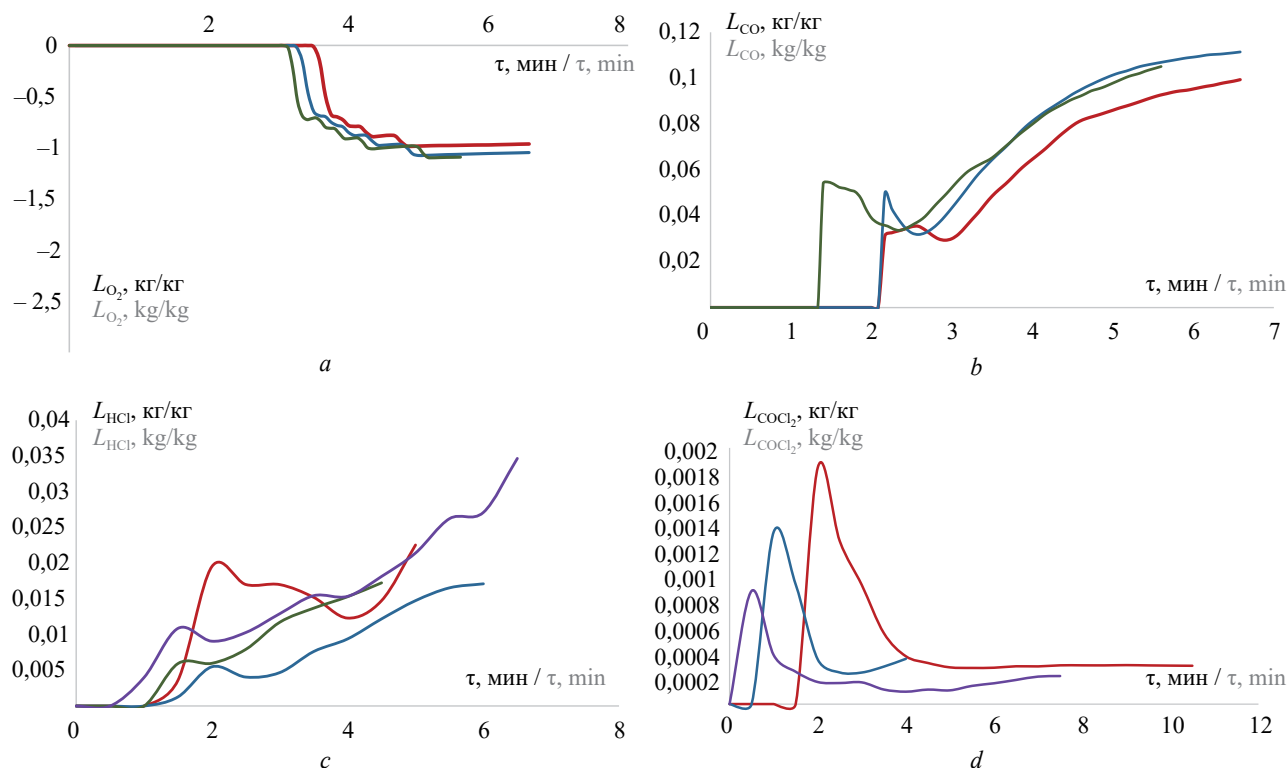


Рис. 5. Зависимости от времени удельного коэффициента поглощения кислорода (а), а также удельных коэффициентов образования оксида углерода (б), хлороводорода (с) и фосгена (д)

Fig. 5. Dependences of the specific oxygen absorption coefficient (a) and the specific coefficients of formation of carbon monoxide (b), hydrogen chloride (c), and phosgene (d) on time during combustion of the non-combustible cables fire load

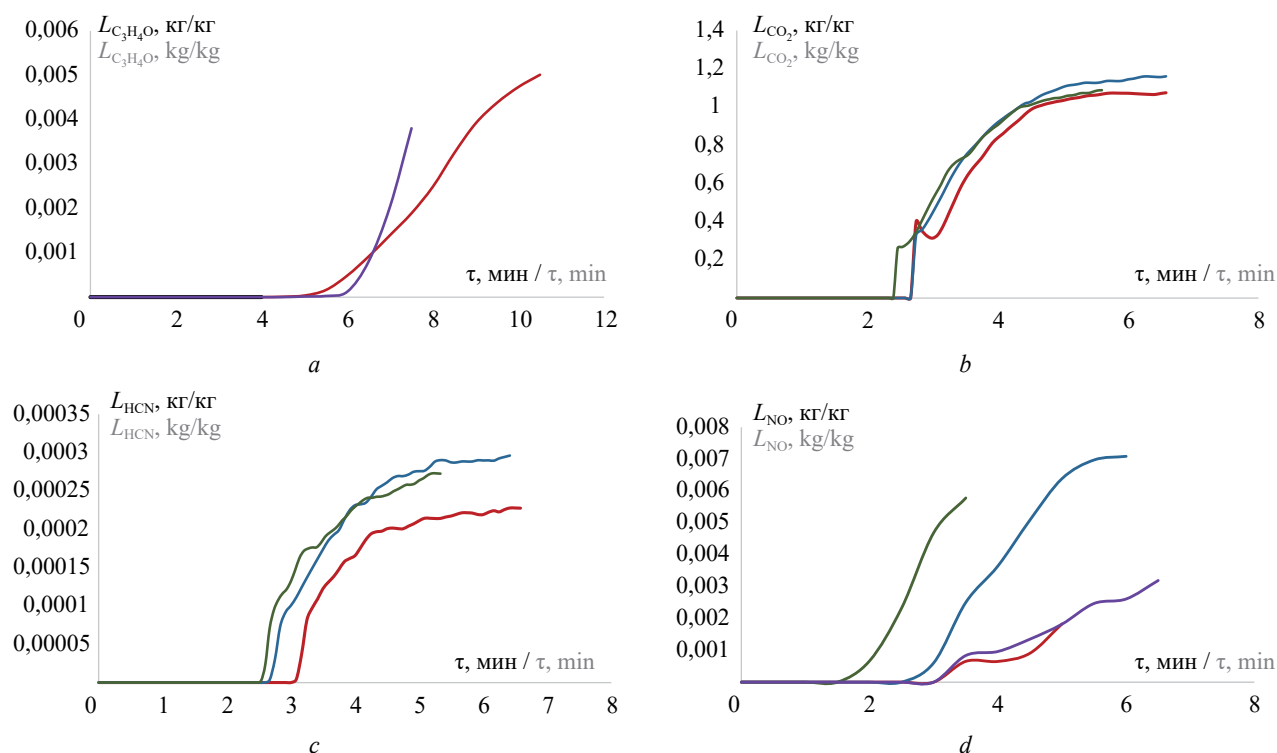


Рис. 6. Зависимости от времени удельных коэффициентов образования акролеина (а), двуоксида углерода (b), циановодорода (с) и монооксида азота (d)
Fig. 6. Time dependences of the specific coefficients of formation of acrolein (a), carbon dioxide (b), and hydrogen cyanide (c) and nitrogen monoxide (d)

Зависимости удельного коэффициента поглощения кислорода и удельных коэффициентов образования токсичных газов от времени испытаний приведены на рис. 5 и 6.

Обнаружено, что диоксид азота не образуется в значимом количестве.

Для применения нового подхода к обработке исходных данных по математическому моделированию динамики опасных факторов пожара [18], учитывающему масштабный фактор (отличие размеров

маломасштабной экспериментальной установки и реального помещения), получены зависимости парциальных плотностей токсичных газов от изменения парциальной плотности кислорода. Эти зависимости приведены в табл. 1.

Зависимости от времени массы образцов (m , г) и удельной массовой скорости выгорания (ψ , кг/с·м²) представлены на рис. 7.

В табл. 2 представлены полученные максимальные значения удельных коэффициентов образова-

Таблица 1. Зависимости парциальных плотностей токсичных газов от изменения парциальной плотности кислорода, образующихся при горении горючей нагрузки кабелей, не распространяющих горение

Table 1. Dependences of the partial densities of toxic gases on the change in the partial density of oxygen formed during combustion of the combustible load “Non-combustible cables”

Токсичный газ Toxic gas	Параметры Parameters	Кабели, не распространяющие горение Non-combustible cables				
Монооксид углерода Carbon monoxide	ρ_{CO} , кг/м ³ ρ_{CO} , kg/m ³	0	0,00033	0,00066	0,00099	0,00132
	$\Delta\rho_{O_2}$, кг/м ³ $\Delta\rho_{O_2}$, kg/m ³	0	0,035	0,070	0,0105	0,014
Диоксид углерода Carbon dioxide	ρ_{CO_2} , кг/м ³ ρ_{CO_2} , kg/m ³	0	0,005	0,010	0,011	0,012
	$\Delta\rho_{O_2}$, кг/м ³ $\Delta\rho_{O_2}$, kg/m ³	0	0,035	0,070	0,0105	0,014

Токсичный газ Toxic gas	Параметры Parameters	Кабели, не распространяющие горение Non-combustible cables				
Хлористый водород Hydrogen chloride	ρ_{HCl} , кг/м ³ ρ_{HCl} , kg/m ³	0	0,00007	0,00014	0,00021	0,00028
	$\Delta\rho_{\text{O}_2}$, кг/м ³ $\Delta\rho_{\text{O}_2}$, kg/m ³	0	0,035	0,070	0,0105	0,014
Циановодород Hydrogen cyanide	ρ_{HCN} , кг/м ³ ρ_{HCN} , kg/m ³	0	0,0000017	0,0000033	0,0000035	0,0000037
	$\Delta\rho_{\text{O}_2}$, кг/м ³ $\Delta\rho_{\text{O}_2}$, kg/m ³	0	0,035	0,070	0,0105	0,014
Фосген Phosgene	ρ_{COCl_2} , кг/м ³ ρ_{COCl_2} , kg/m ³	0	0,0000011	0,0000022	0,0000033	0,0000044
	$\Delta\rho_{\text{O}_2}$, кг/м ³ $\Delta\rho_{\text{O}_2}$, kg/m ³	0	0,035	0,070	0,0105	0,014
Монооксид азота Nitrogen monoxide	ρ_{NO} , кг/м ³ ρ_{NO} , kg/m ³	0	0,0000225	0,000045	0,0000675	0,00009
	$\Delta\rho_{\text{O}_2}$, кг/м ³ $\Delta\rho_{\text{O}_2}$, kg/m ³	0	0,035	0,070	0,0105	0,014
Акролеин Acrolein	$\rho_{\text{C}_3\text{H}_4\text{O}}$, кг/м ³ $\rho_{\text{C}_3\text{H}_4\text{O}}$, kg/m ³	0	0,000015	0,00003	0,000045	0,00006
	$\Delta\rho_{\text{O}_2}$, кг/м ³ $\Delta\rho_{\text{O}_2}$, kg/m ³	0	0,035	0,070	0,0105	0,014

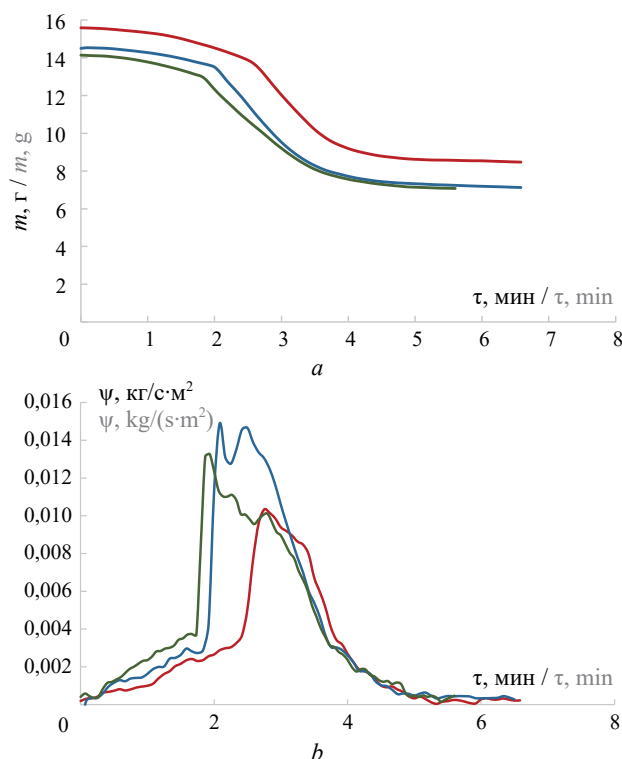


Рис. 7. Зависимости от времени массы образцов (а) и удельной массовой скорости выгорания (б)
Fig. 7. Time-dependent mass of specimens (a) and specific mass rate of burning (b)

ния выделяющихся токсичных газов в сравнении с данными из базы данных горючей нагрузки [19] и работ [1, 20], в которых исследована токсичность кабелей НГ, отличных от данной работы наименований.

Необходимо отметить, что в базе данных горючей нагрузки [19] приведены данные только по трем токсичным газам (СО, СО₂ и НСl).

Из табл. 2 видно, что:

- значения удельных коэффициентов образования СО, СО₂ и НСl, полученные в данной работе и приведенные для электрокабелей в базе данных горючей нагрузки [19], отличаются на величину порядка 70 %;
- величины удельных коэффициентов образования циановодорода, полученные в данной работе и в работах [1, 20], практически совпадают. Анализ результатов экспериментов показал:
- парциальные плотности всех рассматриваемых токсичных газов превышают или соизмеримы с их критическими значениями для человека;
- в образовавшейся при терморазложении газовой смеси присутствуют токсичные газы, которые при их совместном воздействии на человека усиливают свои отдельные токсикологические эффекты (например, СО + НСl, СО + НСN и т.д.).

Таблица 2. Максимальные значения удельных коэффициентов образования токсичных газов при терморазложении изоляции кабелей, не распространяющих горение

Table 2. Maximum values of specific coefficients of formation of toxic gases during thermal decomposition of non-combustible cable insulation

Токсичный газ Toxic gas	Максимальные значения удельных коэффициентов образования токсичных газов L , кг/кг Maximum values of specific coefficients of formation of toxic gases L , kg/kg			
	данная работа this article	работа [19] the article [19]	работа [1] the article [1]	работа [20] the article [20]
Монооксид углерода Carbon monoxide	0,11	0,13	0,075	0,055
Диоксид углерода Carbon dioxide	1,8	0,65	–	–
Хлористый водород Hydrogen chloride	0,035	0,0245	–	–
Циановодород Hydrogen cyanide	0,0003	–	0,0003	0,00035
Фосген Phosgene	0,0019	–	–	–
Монооксид азота Nitrogen monoxide	0,0072	–	–	–
Акролеин Acrolein	0,005	–	–	–

Заключение

Проведенные экспериментальные исследования токсичности продуктов терморазложения изоляции кабелей НГ показали, что образуется смесь токсичных газов (монооксид углерода, диоксид углерода, хлористый водород, циановодород, фосген, диоксид азота и акролеин), которая не учитывается при проведении

пожарно-технических расчетов (например, определение времени блокирования путей эвакуации токсичными газами).

Полученные новые экспериментальные данные по удельным коэффициентам образования вышеуказанных токсичных газов могут быть использованы при расчете пожарных рисков в помещениях, где используются и производятся кабели НГ.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Пузач С.В., Акперов Р.Г., Лебедченко О.С., Болдрушкиев О.Б. Оценка токсичности не распространяющих горение сигнальных кабелей при пожаре в производственных помещениях // Безопасность труда в промышленности. 2022. № 5. С. 75–80. DOI: 10.24000/0409-2961-2022-5-75-80. EDN GDVOGL.
2. Лебедченко О.С. Токсичность газовой среды в помещениях блочного и резервного пультов управления АЭС при пожаре // Безопасность жизнедеятельности. 2024. № 6 (282). С. 52–56. EDN IOSCME.
3. Stec A.A., Hull T.R. Assessment of the fire toxicity of building insulation materials // Energy and Buildings. 2011. No. 43 (2–3). Pp. 498–506. DOI: 10.1016/j.enbuild.2010.10.015
4. Каменский М.К., Мецанов Г.И., Фрик А.А. Кабели и провода пожаробезопасного исполнения. Современное состояние и тенденция развития // Кабели и провода. 2017. № 3 (365). С. 30–35. EDN ZRNTWX.
5. Фрик А.А. Исследования и разработка пожаробезопасных кабелей с применением безгалогенных материалов : дис. ... канд. техн. наук. М., 2016. 163 с. URL: https://rusneb.ru/catalog/000199_000009_008659602/
6. An W., Tang Y., Liang K., Wang T., Zhou Y., Wen Z. Experimental study on flammability and flame spread characteristics of polyvinyl chloride (PVC) cable // Polymers. 2020. No. 12 (12). P. 2789. DOI: 10.3390/polym12122789. EDN YWUYKO.
7. Ke G., Zimeng L., Jinzhang J., Zeyi L., Yisimayili A., Zhipeng Qi. et al. Study on flame spread characteristics of flame-retardant cables in mine // Advances in Polymer Technology. 2020. P. 8765679. DOI: 10.1155/2020/8765679. EDN NYVLOC.
8. Huang X., Zhu H., Peng L., Zheng Z., Zeng W., Bi K. et al. Thermal Characteristics of Vertically Spreading Cable Fires in Confined Compartments // Fire Technology. 2019. No. 55. Pp. 1849–1875. DOI: 10.1007/s10694-019-00833-9. EDN UMIHBS.

9. Wang W., Huo Yu., Kang F, Liu H., Ren H., Yang Bo. et al. Study on hazard of smoke generated by mining cable fires // *Journal of thermal analysis and calorimetry*. 2023. No. 150. Pp. 12175–12185. DOI: 10.1007/s10973-023-12136-x. EDN YPARDX.
10. Al-Sayegh W.A., Aljumaiah O., Andrews G.E., Phylatou H.N. PVC Cable Fire Toxicity using the Cone Calorimeter // *Fire Science and Technology : the Proceedings of 10th Asia-Oceania Symposium on Fire Science and Technology*. 2015. Pp. 175–182. DOI: 10.1007/978-981-10-0376-9_17
11. Lee S.H., Kim M.Ho., Jeong S.Ye., Lee S.K., Lee Ju.E., Lee M.Ch. Fire dynamics simulation in a cable spreading room of a nuclear power plant using fire test results of heat release and toxic gas emission // *Journal of Mechanical Science and Technology*. 2024. No. 38 (3). Pp. 1517–1532. DOI: 10.1007/s12206-024-0243-5. EDN GOEBUK.
12. Hong N., Jia P., Chen S., Hu Ch., Xia. J., Wang B. et al. Enhancing the fire safety and mechanical performance of EVA/IFR cable materials via MXene by nano-synergistic strategy // *Colloid and Polymer Science*. 2025. No. 303. Pp. 1563–1576. DOI: 10.1007/s00396-025-05445-0
13. Yu J., Sun L., Ma Ch., Qiao Yu, Yao H. Thermal degradation of PVC : a review // *Waste Management*. 2016. No. 48. Pp. 300–314. DOI: 10.1016/j.wasman.2015.11.041. EDN WSADOH.
14. Pauluhn J. Acute inhalation toxicity of carbon monoxide and hydrogen cyanide revisited: Comparison of models to disentangle the concentration × time conundrum of lethality and incapacitation // *Regulatory Toxicology and Pharmacology*. 2016. No. 80. Pp. 173–182. DOI: 10.1016/j.yrtph.2016.06.017
15. Лебедченко О.С., Пузач С.В., Акперов Р.Г., Болдрушкиев О.Б. Образование токсичных газов при терморазложении негорючих сигнальных кабелей во время пожара в помещении : мат. VIII Рос. нац. конф. по теплообмену. В 2 т. Т. 1. М. : МЭИ, 2022. С. 226–227. EDN XKVWBE.
16. Пузач С.В., Болдрушкиев О.Б. Определение удельного коэффициента образования и критической парциальной плотности циановодорода и монооксида углерода при пожаре в помещении // *Пожаровзрывобезопасность/Fire and explosion safety*. 2019. № 28 (5). С. 19–26. DOI: 10.18322/PVB.2019.28.05.19-26. EDN XXDNNG.
17. Пузач С.В., Болдрушкиев О.Б. Определение парциальной плотности циановодорода при пожарах на объектах энергетики // *Пожары и чрезвычайные ситуации: предотвращение, ликвидация*. 2020. № 3. С. 5–10. DOI: 10.25257/FE.2020.3.5-10. EDN SACGTB.
18. Пузач С.В., Болдрушкиев О.Б., Сулейкин Е.В. Новый подход к определению показателя токсичности при совместном воздействии циановодорода и монооксида углерода при пожаре в помещении // *Пожары и чрезвычайные ситуации: предотвращение, ликвидация*. 2021. № 2. С. 39–46. DOI: 10.25257/FE.2021.2.39-46. EDN DFMSNJ.
19. Пузач С.В. Методы расчета тепломассообмена при пожаре в помещении и их применение при решении практических задач пожаровзрывобезопасности. М. : Академия ГПС МЧС России, 2005. 336 с. EDN QNKWAX.
20. Пузач С.В., Акперов Р.Г., Лебедченко О.С., Болдрушкиев О.Б. Токсичность изоляции не распространяющих горение силовых кабелей оборудования систем безопасности АЭС при пожаре в помещениях // *Полимерные материалы пониженной горючести : сб. мат. XI Междунар. конф. Волгоград : ВГТУ, 2023. С. 181–185. EDN ZASGOJ.*

REFERENCES

1. Puzach S.V., Akperov R.G., Lebedchenko O.S., Boldrushkiev O.B. Evaluation of the toxicity of flame retardant signal cables in case of fire in the industrial premises. *Occupational Safety in Industry*. 2022; 5:75-80. DOI: 10.24000/0409-2961-2022-5-75-80. EDN GDVOGL. (rus).
2. Lebedchenko O.S. Toxicity of the gas medium in rooms of NPP main and standby control panels in case of fire. *Life Safety*. 2024; 6(282):52-56. EDN IOSCME. (rus).
3. Stec A.A., Hull T.R. Assessment of the fire toxicity of building insulation materials. *Energy and Buildings*. 2011; 43(2-3):498-506. DOI: 10.1016/j.enbuild.2010.10.015
4. Kamensky M.K., Meshchanov G.I., Frick A.A. Fire-safe cables and wires. Current status and development trends. *Cables and wires*. 2017; 3(365):30-35. EDN ZRNTWX. (rus).
5. Frick A.A. Research and development of fire-safe cables using halogen-free materials : *dissertation of a candidate of technical sciences*. Moscow, 2016; 163. URL: https://rusneb.ru/catalog/000199_000009_008659602/ (rus).
6. An W., Tang Y., Liang K., Wang T., Zhou Y., Wen Z. Experimental study on flammability and flame spread characteristics of polyvinyl chloride (PVC) cable. *Polymers*. 2020; 12(12):2789. DOI: 10.3390/polym12122789. EDN YWUYKO.

7. Ke G., Zimeng L., Jinzhang J., Zeyi L., Yisimayili A., Zhipeng Qi. et al. Study on flame spread characteristics of flame-retardant cables in mine. *Advances in Polymer Technology*. 2020; 2020:8765679. DOI: 10.1155/2020/8765679. EDN NYVLOC.
8. Huang X., Zhu H., Peng L., Zheng Z., Zeng W., Bi K. et al. Thermal Characteristics of Vertically Spreading Cable Fires in Confined Compartments. *Fire Technology*. 2019; 55:1849-1875. DOI: 10.1007/s10694-019-00833-9. EDN UMIHBS.
9. Wang W., Huo Yu., Kang F., Liu H., Ren H., Yang Bo. et al. Study on hazard of smoke generated by mining cable fires. *Journal of thermal analysis and calorimetry*. 2023; 150:12175-12185. DOI: 10.1007/s10973-023-12136-x. EDN YPARDX.
10. Al-Sayegh W.A., Aljumaiah O., Andrews G.E., Phylatou H.N. PVC Cable Fire Toxicity using the Cone Calorimeter. *Fire Science and Technology : the Proceedings of 10th Asia-Oceania Symposium on Fire Science and Technology*. 2015; 175-182. DOI: 10.1007/978-981-10-0376-9_17
11. Lee S.H., Kim M.Ho., Jeong S.Ye., Lee S.K., Lee Ju.E., Lee M.Ch. Fire dynamics simulation in a cable spreading room of a nuclear power plant using fire test results of heat release and toxic gas emission. *Journal of Mechanical Science and Technology*. 2024; 38(3):1517-1532. DOI: 10.1007/s12206-024-0243-5. EDN GOEBUK.
12. Hong N., Jia P., Chen S., Hu Ch., Xia J., Wang B. et al. Enhancing the fire safety and mechanical performance of EVA/IFR cable materials via MXene by nano-synergistic strategy. *Colloid and Polymer Science*. 2025; 303:1563-1576. DOI: 10.1007/s00396-025-05445-0
13. Yu J., Sun L., Ma Ch., Qiao Yu., Yao H. Thermal degradation of PVC : a review. *Waste Management*. 2016; 48:300-314. DOI: 10.1016/j.wasman.2015.11.041. EDN WSADOH.
14. Pauluhn J. Acute inhalation toxicity of carbon monoxide and hydrogen cyanide revisited: Comparison of models to disentangle the concentration \times time conundrum of lethality and incapacitation. *Regulatory Toxicology and Pharmacology*. 2016; 80:173-182. DOI: 10.1016/j.yrtph.2016.06.017
15. Lebedchenko O.S., Puzach S.V., Akperov R.G., Boldrushkiev O.B. Formation of toxic gases during thermal decomposition of non-combustible signal cables during a fire in a room : *Proceedings of the 8th Russian National Conference on Heat Transfer. In 2 vols. Vol. 1. Moscow, MPEI, 2022; 226-227. EDN XKVWBE. (rus).*
16. Puzach S.V., Boldrushkiev O.B. Defining the specific formation coefficient and the critical partial density of hydrogen cyanide and carbon monoxide during a fire indoors. *Pozharovzryvobezopasnost' / Fire and Explosion Safety*. 2019; 28(5):19-26. DOI: 10.18322/PVB.2019.28.05.19-26. EDN XXDNNG. (rus).
17. Puzach S.V., Boldrushkiev O.B. Determination of hydrogen cyanide partial density at power facilities fires. *Fires and Emergencies: Prevention and Elimination*. 2020; 3:5-10. DOI: 10.25257/FE.2020.3.5-10. EDN SACGTB. (rus).
18. Puzach S.V., Boldrushkiev O.B., Suleikin E.V. A new approach to determining the toxicity index under the joint impact of hydrogen cyanide and carbon monoxide during a fire in the room. *Fires and emergencies: prevention, elimination*. 2021; 2:39-46. DOI: 10.25257/FE.2021.2.39-46. EDN DFMSNJ. (rus).
19. Puzach S.V. *Methods for calculating heat and mass transfer during a fire in a room and their application in solving practical problems of fire and explosion safety*. Moscow, Academy of the State Fire Service of the Ministry of Emergency Situations of Russia, 2005; 336. EDN QNKWAX. (rus).
20. Puzach S.V., Akperov R.G., Lebedchenko O.S., Boldrushkiev O.B. Toxicity of insulation of flame-retardant power cables of NPP safety system equipment during indoor fires. *Polymeric materials of low flammability : Collection of materials of the XI international conference*. Volgograd, VSTU, 2023; 181-185. EDN ZASGOJ. (rus).

Поступила 19.08.2025, после доработки 03.11.2025;

принята к публикации 04.11.2025

Received August 19, 2025; Received in revised form November 03, 2025;

Accepted November 04, 2025

Информация об авторах

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

Information about the authors

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

ЛЕБЕДЧЕНКО Ольга Сергеевна, д.т.н., доцент, доцент кафедры инженерной теплофизики и гидравлики, Академия Государственной противопожарной службы Министерства Российской Федерации по делам гражданской обороны, чрезвычайным ситуациям и ликвидации последствий стихийных бедствий, Россия, 129366, г. Москва, ул. Бориса Галушкина, 4; AuthorID: 770128, ORCID: 0000-0001-5375-2167; e-mail: ol-26@mail.ru

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

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

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Olga S. LEBEDCHENKO, Dr. Sci. (Eng.), Assistant Professor, Assistant Professor of Thermal Physics and Hydraulic Department, the State Fire Academy of the Ministry of Russian Federation for Civil Defense, Emergencies and Elimination on Consequences of Natural Disasters, Borisa Galushkina St., 4, Moscow, 129366, Russian Federation; AuthorID: 770128; ORCID: 0000-0001-5375-2167; e-mail: ol-26@mail.ru

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

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

The authors declare no conflicts of interests.

Методика повышения уровня пожарной безопасности путем применения газоанализаторов на объектах хранения и обслуживания автомобилей, оснащенных газобаллонным оборудованием

Евгений Евгеньевич Простов¹✉, Денис Михайлович Гордиенко²,
Евгений Николаевич Простов¹, Дмитрий Вадимович Долгих¹

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

² Автономная некоммерческая организация в сфере поддержки отечественных производителей «Консорциум «Производители охранных, пожарных, СКУД систем безопасности» (АНО «Консорциум ПОПСБ»), Москва, Россия

АННОТАЦИЯ

Введение. В рамках выполнения Распоряжения Правительства Российской Федерации от 29 августа 2025 г. № 2366-р идет активное развитие газомоторного транспорта. С целью повышения уровня пожарной безопасности на таких объектах предлагается применение систем непрерывного мониторинга газовой среды.

Цели и задачи. Целью исследования является комплексный анализ различных нормативных документов в области обеспечения пожарной безопасности, применяемых к зданиям с присутствием газобаллонного автомобильного оборудования, и обработка полученных статистических данных и дополнение метода, используемого в расчете пожарного риска для оценки частоты возникновения пожаров к объектам обслуживания автотранспортных средств, использующих газомоторное топливо. Разработать метод повышения уровня пожарной безопасности с учетом возможной расстановки приборов для определения горючих газов на различных объектах.

Методы исследования. Для решения поставленных задач были проведены натурные испытания на специализированном полигоне в Оренбурге с целью изучения полей концентрации истечения горючего газа в закрытом помещении. Полученные данные были систематизированы и позволили с помощью контроля состояния газовой среды сделать предложения по повышению уровня пожарной безопасности объектов с присутствием газобаллонного оборудования (ГБО).

Результаты и их обсуждение. Для оценки частоты возникновения пожаров был проведен анализ статистических данных. В основе расчета использованы показатели общего количества транспортных средств в России, доли автомобилей с ГБО и зарегистрированных случаев возгораний. Результаты были систематизированы и детально изучены. Используя полученные статистические данные и предложенный метод определения частоты, получены коэффициенты «а» и «б».

Заключение. На основании полученных данных, а также с учетом проведенной аналитики и экспериментальных исследований предложен способ повышения уровня пожарной безопасности на станции технического обслуживания (СТО) с наличием газобаллонных автомобилей (ГБА) с помощью учета наличия газоанализаторов на указанных объектах.

Предложенная методика на основании возможности учета устройств по обнаружению загазованности среды на различных объектах с присутствием газобаллонного оборудования поможет снизить вероятность возникновения аварийных ситуаций и позволит совершенствовать существующие расчетные методики.

Ключевые слова: газомоторное топливо; расчет пожарного риска; газоанализаторы

Для цитирования: Простов Е.Е., Гордиенко Д.М., Простов Е.Н., Долгих Д.В. Методика повышения уровня пожарной безопасности путем применения газоанализаторов на объектах хранения и обслуживания автомобилей, оснащенных газобаллонным оборудованием // Пожаровзрывобезопасность/Fire and Explosion Safety. 2025. Т. 34. № 6. С. 23–32. DOI: 10.22227/0869-7493.2025.34.06.23-32

✉ Простов Евгений Евгеньевич, e-mail: prostov.vniipo@mail.ru

Methodology for improving fire safety through the use of gas analyzers at vehicle storage and service facilities equipped with gas cylinder equipment

Evgeny E. Prostov¹✉, Denis M. Gordienko², Evgeny N. Prostov¹, Dmitry V. Dolgikh¹

¹All-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

²Autonomous non-profit organization in the field of support for domestic manufacturers "Consortium "Manufacturers of security, fire, ACS security systems" (ANO "Consortium of Security Services"), Moscow, Russian Federation

ABSTRACT

Introduction. As part of the implementation of the Order of the Government of the Russian Federation dated August 29, 2025, No. 2366-r, there is an active development of gas-powered transport. In order to improve the level of fire safety at such facilities, it is proposed to use continuous monitoring systems for the gas-air environment.

Aims and Purposes. The purpose of the study is to conduct a comprehensive analysis of various regulatory documents in the field of fire safety applied to buildings with the presence of gas-cylinder automotive equipment, to process the obtained statistical data, and to supplement the method used in calculating fire risk to assess the frequency of fires at facilities for servicing vehicles using gas-powered fuel. To develop a method for improving fire safety, taking into account the possible placement of devices for detecting combustible gases at various facilities.

Research methods. To solve the set tasks, field tests were conducted at a specialized test site in Orenburg to study the concentration fields of combustible gas in an enclosed space. The data obtained were systematized and allowed for the development of proposals to improve the fire safety of facilities with GCE systems by monitoring the state of the gas-air environment.

Results and Discussion. Statistical data was analyzed to assess the frequency of fires. The calculation was based on the total number of vehicles in Russia, the proportion of cars with GCE systems, and the number of registered fire incidents. The results were systematized and studied in detail. Using the statistical data obtained and the proposed method for determining frequency, coefficients "a" and "b" were obtained.

Conclusion. Based on the data obtained, as well as taking into account the conducted analytics and experimental studies, a method has been proposed to improve the level of fire safety at service stations with GPT by taking into account the presence of gas analyzers at these facilities.

The proposed methodology, based on the possibility of accounting for devices for detecting gas contamination in various facilities with the presence of gas-cylinder equipment, will help reduce the likelihood of emergencies and improve existing calculation methods.

Keywords: gas engine fuel; fire risk calculation; gas analyzers

For citation: Prostov E.E., Gordienko D.M., Prostov E.N., Dolgikh D.V. Methodology for improving fire safety through the use of gas analyzers at vehicle storage and service facilities equipped with gas cylinder equipment. *Pozharovzryvobezopasnost/Fire and Explosion Safety*. 2025; 34(6):23-32. DOI: 10.22227/0869-7493.2025.34.06.23-32 (rus).

✉ Evgeny Evgenievich Prostov, e-mail: prostov.vniipo@mail.ru

Введение

Стратегические инициативы по модернизации транспортных систем в последние годы ориентированы на три ключевых критерия: повышение безопасности, снижение экологической нагрузки и обеспечение бесперебойности перевозок. Для достижения поставленной цели в рамках реализации Распоряжения Правительства Российской Федерации¹ идет активное развитие газомоторного транспорта, что, в свою очередь, приводит к росту предприятий по техническому обслуживанию таких автомобилей.

Следует отметить, что эксплуатация инфраструктуры по обслуживанию газомоторного транспорта

сопряжена с повышенными рисками возникновения чрезвычайных ситуаций, включая:

- утечки газа с последующим воспламенением;
- взрывы газоздушных смесей;
- пожары с распространением на прилегающие территории.

Проектирование инфраструктуры для газомоторного транспорта требует комплексного подхода, где пожарная безопасность выступает неотъемлемым элементом.

Цель и задачи

Целью исследования является комплексный анализ различных нормативных документов в области обеспечения пожарной безопасности, применяемых к зданиям с присутствием газобаллонного автомобильного оборудования, и обработка получен-

¹ Об утверждении Концепции развития рынка газомоторного топлива в Российской Федерации на период до 2035 года и плана мероприятий по ее реализации : Распоряжение Правительства РФ от 29.08.2025 № 2366-р.

ных статистических данных и дополнение метода, используемого в расчете пожарного риска для оценки частоты возникновения пожаров к объектам обслуживания автотранспортных средств с установленным газобаллонным оборудованием (далее — ГБО) [1].

В настоящее время действующая Методика определения расчетных величин пожарного риска на производственных объектах² не позволяет учитывать наличие газоанализаторов на указанных объектах. Для реализации поставленной задачи были рассмотрены требования различных документов в области пожарной безопасности для объектов с присутствием автотранспортных средств с ГБО.

Полученные статистические данные были обработаны, систематизированы и использовались при определении частоты возникновения пожаров на станции технического обслуживания (СТО) с ГБО.

Методы исследования

Для решения поставленных задач были проведены натурные испытания на специализированном полигоне в Оренбурге на базе ФГБУ ВНИИПО МЧС России с целью изучения полей концентрации истечения горючего газа в закрытом помещении, построения модели в программном комплексе ANSYS. Получены данные были систематизированы, обработаны и позволили с помощью использования контроля состояния газовой среды сделать предложения по повышению уровня пожарной безопасности объектов с наличием ГБО [1, 2].

На первом этапе исследованы конструктивные особенности газобаллонного оборудования, собрана и систематизирована статистика возгораний и взрывов на газобаллонных автомобилях (далее — ГБА), а также проанализированы реальные случаи аварий-

ных ситуаций с последствиями в виде пожаров и разрушений.

Параллельно проведен анализ нормативной базы, регулирующей противопожарные требования к объектам инфраструктуры, обслуживающим ГБА. Изучены как российские, так и зарубежные стандарты безопасности, применяемые при проектировании зданий для ремонта, технического обслуживания и хранения газомоторного транспорта, а также на этапе эксплуатации.

Результаты и их обсуждение

В работах [3, 4] после проведения анализа, систематизации и обработки полученных данных были выявлены основные причины пожаров на ГБА, представленные в табл. 1.

Проведя анализ, можно выявить закономерность, что количество аварий приведено на единицу оборудования (автотранспортного средства), а в существующей Методике² используется частота возникновения пожара на единицу площади помещения. Поэтому возникла необходимость преобразования полученных результатов, чтобы их можно было использовать [1].

Формула по расчету частоты пожара из Методики² используется, когда таблица П.3 Методики² не содержит необходимых данных, а площадь зданий (помещений) превышает 10 000 м². При отсутствии данных о частоте возникновения пожара на различных объектах (в том числе возникшего в результате ошибки работника) используются сведения по частотам реализации иницирующих пожароопасные ситуации событий, а также частотам возникновения пожаров в зданиях, указанные в Приложении № 1 к Методике² [5].

В рассматриваемых объектах защиты целесообразно принять, что наибольшую пожарную нагрузку представляет автомобиль (а также топливо, которое находится внутри автомобиля). Исходя из этого, допускается предположить, что величину «а» можно выразить как отношение аварий на аналогичном оборудовании (транспортном средстве)

² Об утверждении Методики определения расчетных величин пожарного риска на производственных объектах : Приказ МЧС России от 26 июня 2024 г. № 533.

Таблица 1. Количество транспортных средств в России с установленным газобаллонным оборудованием с распределением по причинам аварий 2015–2022 гг.

Table 1. Number of vehicles in Russia with installed gas cylinder equipment, by cause of accident from 2015–2022

Причины аварий Causes of accidents	Нарушения правил устройства и эксплуатации транспортных средств Violations of vehicle design and operation rules	Нарушения правил устройства и эксплуатации газового оборудования Violations of the rules for the installation and operation of gas equipment	Поджог Arson	Другие причины Other reasons
Транспортные средства Vehicles				
Грузовые автомобили Trucks	1447	96	276	308
Автобусы Buses	690	31	103	105
Легковые автомобили Passenger cars	4688	261	1417	1193

Таблица 2. Коэффициенты для определения частоты возникновения пожара «а» и «б» для СТО с присутствием различных автомобилей «а» и «б» для СТО с присутствием различных автомобилей**Table 2.** Coefficients for determining the frequency of fire occurrence “a” and “b” for service stations with the presence of various vehicles

Статистический показатель Statistical indicator	Значение показателя для автотранспортных средств, работающих на ЖМТ The value of the indicator for vehicles powered by liquid fuel		Значение показателя для автотранспортных средств, работающих на ГМТ The value of the indicator for GMT-powered vehicles
	Расчетные данные Calculated data	Справочные данные Background information	
a	0,0002333	0,0001200	0,0000502
b	0,86		0,84

к количеству отличных видов такого оборудования в рассматриваемом сегменте за выбранный период времени.

В этом случае к главным отличиям рассматриваемых автомобилей относится конструкция топливной системы, а именно наличие ГБО, установленного на транспортном средстве. Таким образом возможно использовать полученные ранее статистические данные для оценки аварий и пожаров как на автотранспортных средствах с ГБО, так и без него.

Для оценки частоты возникновения пожаров на СТО с ГБО был проведен анализ статистических данных. В основе расчета использованы показатели общего количества транспортных средств в России, доли автомобилей, оснащенных газобаллонным обо-

рудованием, и зарегистрированных случаев возгораний. По итогам анализа были систематизированы и детально изучены основные причины пожаров [4].

Используя полученные статистические данные и предложенный метод определения частоты, аналогичный представленному в Методике² по расчету пожарного риска, получены коэффициенты «а» и «б» для ГБА (табл. 2) [6].

Был проведен натурный эксперимент с целью получения временных зависимостей изменения концентрации горючих газов в газовой среде. Полученные экспериментальные данные были использованы для валидации результатов математического моделирования процесса формирования газовой смеси в условиях замкнутого пространства [7–9].

Таблица 3. Использование газоанализаторов совместно с системами обеспечения пожарной безопасности в виде инициатора данных систем**Table 3.** The use of gas analyzers in conjunction with fire safety systems in the form of initiators of these systems

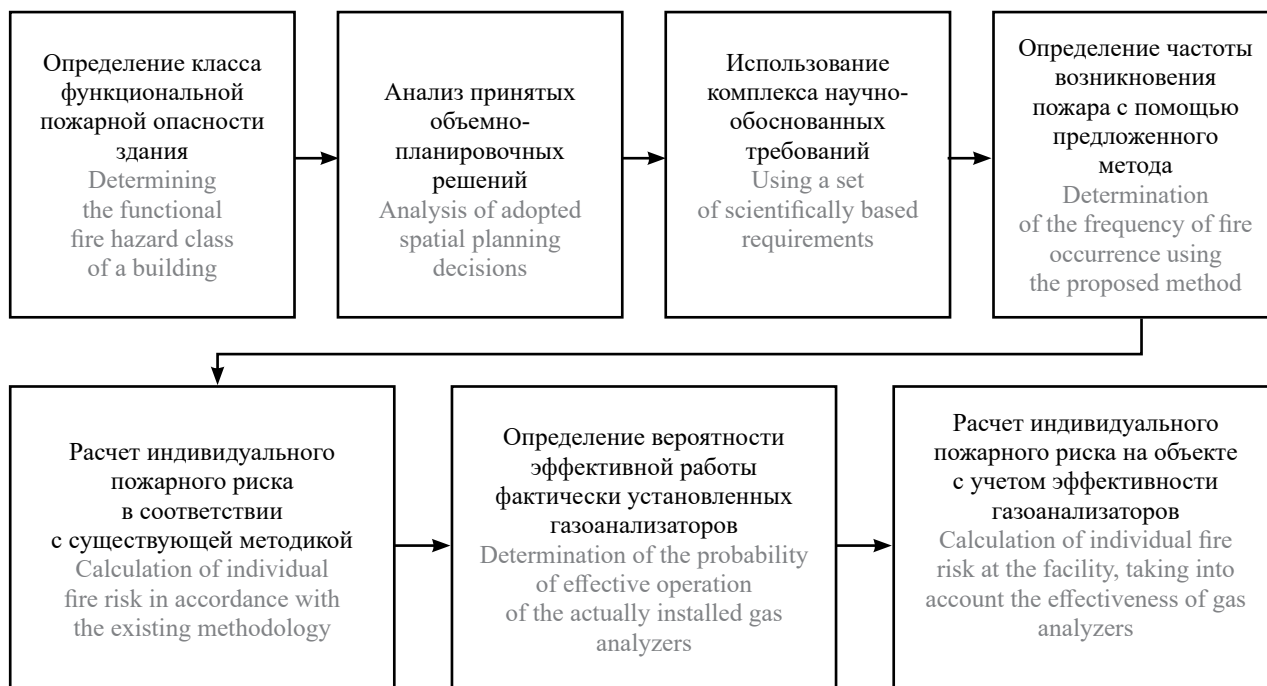
Номер критерия (тип технического решения) Criterion number (type of technical solution)	Численное значение критерия Numerical value of the criterion	Формула для определения величины индивидуального пожарного риска при применении газоанализаторов The formula for determining the magnitude of individual fire risk when using gas analyzers	Техническое решение Technical solution
1	$\frac{R_{\phi}}{R_{\text{без}}} \leq 24, \text{ при } P_r = 0,999;$ $\frac{R_{\phi}}{R_{\text{без}}} \leq 17, \text{ при } P_r = 0,95;$ $\frac{R_{\phi}}{R_{\text{без}}} \leq 12, \text{ при } P_r = 0,9;$ $\frac{R_{\phi}}{R_{\text{без}}} \leq 7, \text{ при } P_r = 0,8$ $\frac{R_f}{R_{\text{без}}} \leq 24, \text{ if } P_g = 0.999;$ $\frac{R_f}{R_{\text{без}}} \leq 17, \text{ if } P_g = 0.95;$ $\frac{R_f}{R_{\text{без}}} \leq 12, \text{ if } P_g = 0.9;$ $\frac{R_f}{R_{\text{без}}} \leq 7, \text{ if } P_g = 0.8$	$R_r^{\text{сп}} = Q_{\text{п}} \cdot q \times (1 - (1 - (1 - D_{\text{СПС}} \cdot P_r) \times (1 - D_{\text{СОУЭ}} \cdot P_r)))$ $R_g^{\text{кр}} = Q_p \cdot q \times (1 - (1 - (1 - D_{\text{СПС}} \cdot P_g) \times (1 - D_{\text{СОУЭ}} \cdot P_g)))$	<p>При аварийной ситуации из автомобиля начал выходить газ, расставленные газоанализаторы фиксируют повышение концентрации газа и инициируют срабатывание системы оповещения и управления эвакуацией людей при пожаре (далее — СОУЭ) (при этом вероятность эффективного срабатывания газоанализаторов и СОУЭ должна учитываться совместно)</p> <p>In an emergency situation, gas began to leak from the vehicle, the gas analyzers detected an increase in gas concentration and initiated the fire alarm and evacuation control system (hereinafter referred to as the FACS) (the probability of effective operation of the gas analyzers and the FACS must be taken into account jointly)</p>

Номер критерия (тип технического решения) Criterion number (type of technical solution)	Численное значение критерия Numerical value of the criterion	Формула для определения величины индивидуального пожарного риска при применении газоанализаторов The formula for determining the magnitude of individual fire risk when using gas analyzers	Техническое решение Technical solution
2	$24 < \frac{R_{\Phi}}{R_{\text{без}}} \leq 123, \text{ при } P_r = 0,999;$ $17 < \frac{R_{\Phi}}{R_{\text{без}}} \leq 72, \text{ при } P_r = 0,95;$ $12 < \frac{R_{\Phi}}{R_{\text{без}}} \leq 45, \text{ при } P_r = 0,9;$ $7 < \frac{R_{\Phi}}{R_{\text{без}}} \leq 21, \text{ при } P_r = 0,8$ $24 < \frac{R_f}{R_{\text{без}}} \leq 123, \text{ if } P_g = 0,999;$ $17 < \frac{R_f}{R_{\text{без}}} \leq 72, \text{ if } P_g = 0,95;$ $12 < \frac{R_f}{R_{\text{без}}} \leq 45, \text{ if } P_g = 0,9;$ $7 < \frac{R_f}{R_{\text{без}}} \leq 21, \text{ if } P_g = 0,8$	$R_r^{\text{кр}_2} = Q_{\text{п}} \cdot q \times (1 - (1 - (1 - D_{\text{СПС}} \cdot P_r) \times (1 - D_{\text{СОУЭ}} \cdot P_r) \times (1 - D_{\text{ПДЗ}} \cdot P_r)))$ $R_g^{\text{кр}_2} = Q_p \cdot q \times (1 - (1 - (1 - D_{\text{СПС}} \cdot P_g) \times (1 - D_{\text{СОУЭ}} \cdot P_g) \times (1 - D_{\text{ПДЗ}} \cdot P_g)))$	<p>При аварийной ситуации из автомобиля начал выходить газ, расставленные газоанализаторы фиксируют повышение концентрации газа и инициируют срабатывание системы противодымной защиты (далее — ПДЗ) для удаления взрывоопасной смеси за пределы помещения (при этом вероятность эффективного срабатывания газоанализаторов и ПДЗ должна учитываться совместно)</p> <p>In an emergency situation, gas began to escape from the vehicle, the gas analyzers detected an increase in gas concentration and initiated the activation of the smoke protection system (hereinafter referred to as SPS) to remove the explosive mixture from the premises (the probability of effective activation of the gas analyzers and SPS must be taken into account jointly)</p>
3	$123 < \frac{R_{\Phi}}{R_{\text{без}}} \leq 245, \text{ при } P_r = 0,999;$ $72 < \frac{R_{\Phi}}{R_{\text{без}}} \leq 120, \text{ при } P_r = 0,95;$ $45 < \frac{R_{\Phi}}{R_{\text{без}}} \leq 67, \text{ при } P_r = 0,9;$ $21 < \frac{R_{\Phi}}{R_{\text{без}}} \leq 27, \text{ при } P_r = 0,8$ $123 < \frac{R_f}{R_{\text{без}}} \leq 245, \text{ if } P_g = 0,999;$ $72 < \frac{R_f}{R_{\text{без}}} \leq 120, \text{ if } P_g = 0,95;$ $45 < \frac{R_f}{R_{\text{без}}} \leq 67, \text{ if } P_g = 0,9;$ $21 < \frac{R_f}{R_{\text{без}}} \leq 27, \text{ if } P_g = 0,8$	$R_r^{\text{кр}_3} = Q_{\text{п}} \cdot q \times (1 - (1 - (1 - D_{\text{СПС}} \cdot P_r) \times (1 - D_{\text{СОУЭ}} \cdot P_r) \times (1 - D_{\text{АУПГ}} \cdot P_r)))$ $R_g^{\text{кр}_3} = Q_p \cdot q \times (1 - (1 - (1 - D_{\text{СПС}} \cdot P_g) \times (1 - D_{\text{СОУЭ}} \cdot P_g) \times (1 - D_{\text{АУПГ}} \cdot P_g)))$	<p>При аварийной ситуации из автомобиля начал выходить газ, расставленные газоанализаторы фиксируют повышение концентрации газа и инициируют срабатывание автоматической установки пожаротушения (далее — АУПТ) для предупреждения возникновения горения (при этом вероятность эффективного срабатывания газоанализатора и АУПТ должна учитываться совместно)</p> <p>In an emergency situation, gas began to escape from the vehicle. The gas analyzers detected an increase in gas concentration and initiated the automatic fire extinguishing system (hereinafter referred to as AFES) to prevent combustion (the probability of effective operation of the gas analyzer and AFES must be taken into account jointly)</p>

Номер критерия (тип технического решения) Criterion number (type of technical solution)	Численное значение критерия Numerical value of the criterion	Формула для определения величины индивидуального пожарного риска при применении газоанализаторов The formula for determining the magnitude of individual fire risk when using gas analyzers	Техническое решение Technical solution
4	$246 < \frac{R_{\phi}}{R_{\text{без}}} \leq 1224, \text{ при } P_r = 0,999;$ $120 < \frac{R_{\phi}}{R_{\text{без}}} \leq 500, \text{ при } P_r = 0,95;$ $67 < \frac{R_{\phi}}{R_{\text{без}}} \leq 240, \text{ при } P_r = 0,9;$ $27 < \frac{R_{\phi}}{R_{\text{без}}} \leq 76, \text{ при } P_r = 0,8$ $246 < \frac{R_f}{R_{\text{без}}} \leq 1,224, \text{ if } P_g = 0,999;$ $120 < \frac{R_f}{R_{\text{без}}} \leq 500, \text{ if } P_g = 0,95;$ $67 < \frac{R_f}{R_{\text{без}}} \leq 240, \text{ if } P_g = 0,9;$ $27 < \frac{R_f}{R_{\text{без}}} \leq 76, \text{ if } P_g = 0,8$	$R_r^{\text{кpa}} = Q_{\text{п}} \cdot q \times (1 - (1 - (1 - D_{\text{спс}} \cdot P_r) \times (1 - D_{\text{союз}} \cdot P_r) \times (1 - D_{\text{авпг}} \cdot P_r)))$ $R_g^{\text{кpa}} = Q_p \cdot q \times (1 - (1 - (1 - D_{\text{спс}} \cdot P_g) \times (1 - D_{\text{союз}} \cdot P_g) \times (1 - D_{\text{авпг}} \cdot P_g)))$	<p>Если при расчете требуемая эффективность выше фактической, то необходимо добавлять совместное участие ГА и дополнительных систем (АУПТ и ПДЗ)</p> <p>If the calculated required efficiency is higher than the actual efficiency, it is necessary to add the joint participation of GE and additional systems (AFES and SPS)</p>

Примечание: формула приведена без учета вероятности эвакуации людей (P_э) и вероятности эффективной работы технических средств по обеспечению безопасности (D_т), применяемых без газоанализатора.

Note: the formula is given without taking into account the probability of evacuation of people (P_e) and the probability of effective operation of safety equipment (D_i) used without a gas analyzer.



Алгоритм методики повышения уровня пожарной безопасности предприятий по обслуживанию ГБА
Algorithm of the methodology for increasing the level of fire safety of gas turbine maintenance enterprises

На основании полученных данных проведена оценка технических параметров как самой системы, так и ее элементов [10–12]. Результаты полученных значений и параметров, которые необходимо учитывать при расстановке газоанализаторов, представлены в работе [1] и могут быть использованы при дальнейших исследованиях.

Полученные результаты позволяют применить полученные значения при расчете пожарного риска с учетом совместного использования различных технических средств обеспечения пожарной безопасности и приборов обнаружения загазованности среды [13, 14] в зависимости от вероятности эффективности их работы. Указанный подход используется также при определении требуемой вероятности эффективной работы газоанализаторов [15–17]. Результаты представлены в табл. 3.

По формулам табл. 3 были определены значения величины индивидуального пожарного риска в зависимости от частоты возникновения пожара для каждого типа технического решения, пересчитанной на площадь объекта защиты, в зависимости от выбранного технического решения и необходимого численного значения критерия [1].

Предложенная методика и комплекс научно-обоснованных требований [1, 18] позволили разработать алгоритм повышения уровня пожарной безопасности для СТО с наличием ГБА (рис.).

Заключение

На основании полученных данных, а также с учетом проведенной аналитики и экспериментальных

исследований предложен способ повышения уровня пожарной безопасности на СТО с наличием ГБА с помощью учета наличия газоанализаторов на указанных объектах [1].

Дальнейшее совершенствование нормативно-технических документов для рассматриваемых объектов является перспективным направлением. Дальнейшие исследования, в том числе в области модернизации расчета пожарного риска, позволят учитывать наличие приборов по определению загазованности среды, снижать риски возникновения аварийных ситуаций и тем самым уменьшать вероятность гибели людей, снижать материальные потери предприятий. Аналогичный подход по определению частоты возникновения пожаров уже используется при определении необходимых показателей [5].

В результате использования компьютерного моделирования и полученных экспериментальных данных определены поля концентрации газов, на основе которых обоснованы оптимальные места размещения газоанализаторов [7, 11]. Данный способ может быть использован при совершенствовании расчета пожарного риска с учетом размещения газоанализаторов в помещении [1, 19].

В совокупности предложенная методика повышения уровня пожарной безопасности путем применения приборов по определению загазованности среды на СТО с ГБА и поможет снизить вероятность возникновения аварийных ситуаций, уменьшить вероятность травматизма и гибели людей, а также позволит совершенствовать существующие расчетные методики [1, 20].

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. *Простов Е.Е.* Обеспечение пожарной безопасности объектов обслуживания автомобилей на газомоторном топливе посредством контроля состава газовой среды : дис. ... канд. тех. наук. СПб. : Санкт-Петербургский гос. ун-т МЧС России, 2024. 129 с. URL: <https://search.rsl.ru/ru/record/01013238481>
2. *Овчинникова Л.А., Назымов Е.В.* Пожарная безопасность помещений хранения и технического обслуживания газобаллонных автомобилей // Актуальные проблемы агропромышленного комплекса : сб. тр. науч.-практ. конф. преподавателей, аспирантов, магистрантов и студентов Новосибирского ГАУ. Новосибирск : ИЦ НГАУ, 2018. Вып. 3. Т. 1. С. 172–176. EDN SIRPON.
3. *Простов Е.Е., Простов Е.Н., Гордиенко Д.М.* Определение частоты возникновения пожара в России на транспорте, работающем на КПП и СУГ // Пожарная безопасность. 2021. № 3 (104). С. 24–31. DOI: 10.37657/vniipro.pb.2021.54.13.002. EDN KXATQB.
4. *Brecher A., Epstein A.K., Breck A.* Review and analysis of potential safety impacts of and regulatory barriers to fuel efficiency technologies and alternative fuels in medium- and heavy-duty vehicles. Report No. DOT HS 812 159. Washington, DC : National Highway Traffic Safety Administration, 2015. 193 p. URL: <https://rosap.ntl.bts.gov/view/dot/12207>
5. *Полетаев А.Н., Гончаренко В.С., Журавлев Ю.Ю., Кирик Е.С., Нестеров М.Ю.* Статистические данные по частотам возникновения пожаров на различных производственных и складских объектах в РФ // Пожаровзрывобезопасность/Fire and Explosion Safety. 2025. № 34 (4). С. 42–61. DOI: 10.22227/0869-7493.2025.34.04.42-61. EDN YKETTS.

6. *Простов Е.Е.* Метод определения частоты возникновения пожаров на объектах с хранением и обслуживанием автотранспортных средств, работающих на газомоторном топливе // Проблемы управления рисками в техносфере. 2023. № 4 (68). С. 226–237. EDN AYQHLP.
7. *Простов Е.Е.* Экспериментальные исследования истечения пропана в закрытом производственном помещении // Пожарная безопасность. 2021. № 4 (105). С. 25–30. DOI: 10.37657/vniipo.pb.2021.26.73.002. EDN TLCJTR.
8. *Jaimes D., McDonel V.G., Samuelsen G.S.* Lean flammability limits of syngas/air mixtures at elevated temperatures and pressures // *Energy&Fuels*. 2018. No. 32 (10). Pp. 10964–10973. DOI: 10.1021/ACS.ENERGYFUELS.8B02031
9. *Huang L., Pei S., Wang Y., Zhang L., Ren S., Zhang Z. et al.* Assessment of flammability and explosion risks of natural gas-air mixtures at high pressure and high temperature // *Fuel*. 2019. No. 247. Pp. 47–56. DOI: 10.1016/j.fuel.2019.03.023. EDN IFOYMT.
10. *Manes M., Rush D.* Assessing fire frequency and structural fire behavior of England statistics according to BS PD 7974-7 // *Fire Safety Journal*. 2020. No. 120 (7). P. 103030. DOI: 10.1016/j.firesaf.2020.103030
11. *Hariti R., Fekih M., Saighi M.* Numerical simulation of heat transfer by natural convection in a storage tank // *International Journal of Application or Innovation in Engineering & Management (IAIEM)*. 2013. No. 2 (8). Pp. 340–343.
12. *Barnett A., Cheng Ch., Horasan M., He Ya., Park L.* Fire Load Density Distribution in School Buildings and Statistical Modelling // *Fire Technology*. 2022. No. 58 (1). Pp. 503–521. DOI: 10.1007/s10694-021-01150-w. EDN FAJDXQ.
13. *Простов Е.Е.* Метод оценки эффективности газоанализаторов при обеспечении пожарной безопасности объектов обслуживания автомобилей на газомоторном топливе // Пожарная безопасность. 2024. № 2 (115). С. 40–49. DOI: 10.37657/vniipo.pb.2024.115.2.004. EDN CTDVPC.
14. *Кожевин Д.Ф., Матвеев А.В., Самигуллин Г.Х., Смирнов А.С.* Метод многокритериальной оценки эффективности технических средств в организационно-технических системах // Вестник Санкт-Петербургского университета ГПС МЧС России. 2023. № 4. С. 59–70. DOI: 10.61260/2218-13X-2023-4-59-70. EDN NWHMER.
15. *Lin Y., Lange D., Seligmann B.J.* Causal Network Topology Analysis (CaNeTA) as a tool for risk assessment in fire safety engineering // *Fire Safety Journal*. 2023. No. 140. P. 103880. DOI: 10.1016/j.firesaf.2023.103880. EDN XELBMI.
16. *Таранцев А.А., Кожевин Д.Ф., Поташев Д.А.* Марковская модель каскадного развития пожаровзрывоопасной ситуации на автостоянке // Вестник Санкт-Петербургского университета Государственной противопожарной службы МЧС России. 2023. № 4. С. 16–25. DOI: 10.61260/2218-130X-2023-4-16-25. EDN LHASVS.
17. *Зыков П.И., Контарь Н.А., Субачев С.В., Субачева А.А.* О расчете вероятности эффективной работы технических средств по обеспечению пожарной безопасности при определении расчетных величин пожарного риска на производственных объектах // Техносферная безопасность. 2021. № 4 (33). С. 67–71. EDN DHYQJX.
18. *Шебеко А.Ю., Простов Е.Е., Гордиенко Д.М., Молчанов В.П.* Сравнительный анализ требований пожарной безопасности к предприятиям по обслуживанию и хранению автомобилей на газомоторном топливе // Пожарная безопасность. 2019. № 4 (97). С. 78–86. EDN GMRFHI.
19. *Бардин А.В.* Моделирование пожарной нагрузки на конструкции в программном комплексе ANSYS // Строительство уникальных зданий и сооружений. 2016. № 6 (45). С. 55–67. EDN WEFRDN.
20. *Тимошенко А.Л., Самигуллин Г.Х.* Критериальная модель оценки уровня пожарной опасности технологического оборудования водородной энергетики // Проблемы управления рисками в техносфере. 2023. № 3 (67). С. 96–105. DOI: 10.61260/1998-8990-2023-3-96-105. EDN OZHONT.

REFERENCES

1. Prostov E.E. Ensuring fire safety of facilities for servicing gas-powered vehicles by monitoring the composition of the gas-air environment : *dissertation of a candidate of technical sciences*. St. Petersburg, St. Petersburg State University of the Russian Ministry of Emergency Situations, 2024; 129. URL: <https://search.rsl.ru/ru/record/01013238481> (rus).
2. Ovchinnikova L.A., Nazimov E.V. Fire safety of storage and maintenance facilities for gas-cylinder vehicles. Actual problems of the agro-industrial complex : *collection of scientific and practical conference of teachers, postgraduate students, master's students and students of the Novosibirsk State Agrarian University*. Novosibirsk, IC NGAU Information Center, 2018; 1(3):172-176. EDN SIRPOH. (rus).
3. Prostov E.E., Prostov E.N., Gordienko D.M. Determination of fire frequency on CNG and LPG transport in Russia. *Fire safety*. 2021; 3(104):24-31. DOI: 10.37657/vniipo.pb.2021.54.13.002. EDN KXATQB. (rus).

4. Brecher A., Epstein A.K., Breck A. *Review and analysis of potential safety impacts of and regulatory barriers to fuel efficiency technologies and alternative fuels in medium- and heavy-duty vehicles*. Report No. DOT HS 812 159. Washington, DC, National Highway Traffic Safety Administration. 2015; 193. URL: <https://rosap.ntl.bts.gov/view/dot/12207>
5. Poletaev A.N., Goncharenko V.S., Zhuravlev Yu.Yu., Kirik E.S., Nesterov M.Yu. Fire frequency statistics for various production and warehouse facilities in the Russian Federation. *Pozharovzryvbezopasnost/Fire and Explosion Safety*. 2025; 34(4):42-61. DOI: 10.22227/0869-7493.2025.34.04.42-61. EDN YKETTS. (rus).
6. Prostov E.E. A method for determining the frequency of fires at facilities with storage and maintenance of vehicles running on gas fuel. *Problems of technosphere risk management*. 2023; 4(68):226-237. EDN AYQHLP. (rus).
7. Prostov E.E. Review of an experiment to study the propane discharge in a closed production area. *Fire safety*. 2021; 4(105):25-30. DOI: 10.37657/vniipo.pb.2021.26.73.002. EDN TLCJTR. (rus).
8. Jaimes D., McDonel V. G., Samuelsen G.S. Lean flammability limits of syngas/air mixtures at elevated temperatures and pressures. *Energy&Fuels*. 2018; 32(10):10964-10973. DOI: 10.1021/ACS.ENERGYFUELS.8B02031
9. Huang L., Pei S., Wang Y., Zhang L., Ren S., Zhang Z. et al. Assessment of flammability and explosion risks of natural gas-air mixtures at high pressure and high temperature. *Fuel*. 2019; 247:47-56. DOI: 10.1016/j.fuel.2019.03.023. EDN IFOYMT.
10. Manes M., Rush D. Assessing fire frequency and structural fire behavior of England statistics according to BS PD 7974-7. *Fire Safety Journal*. 2020; 120(7):103030. DOI: 10.1016/j.firesaf.2020.103030
11. Hariti R., Fekih M., Saighi M. Numerical simulation of heat transfer by natural convection in a storage tank. *International Journal of Application or Innovation in Engineering & Management (IJAIEEM)*. 2013; 2(8):340-343.
12. Barnett A., Cheng Ch., Horasan M., He Ya., Park L. Fire Load Density Distribution in School Buildings and Statistical Modeling. *Fire Technology*. 2022; 58(1):503-521. DOI: 10.1007/s10694-021-01150-w. EDN FAJDXQ.
13. Prostov E.E. Method for evaluating the efficiency of gas analyzers when providing fire safety of gas-powered vehicle maintenance facilities. *Fire safety*. 2024; 2(115):40-49. DOI: 10.37657/vniipo.pb.2024.115.2.004. EDN CTDVPC. (rus).
14. Kozhevnikov D.F., Matveev A.V., Samigullin G.H., Smirnov A.S. Method of multi-criteria evaluation of technical means efficiency in organizational and technical systems. *Vestnik Saint-Petersburg University of State fire service of EMERCOM of Russia*. 2023; 4:59-70. DOI: 10.61260/2218-13X-2023-4-59-70. EDN NWHMEP. (rus).
15. Lin Y., Lange D., Seligmann B.J. Causal Network Topology Analysis (CaNeTA) as a tool for risk assessment in fire safety engineering. *Fire Safety Journal*. 2023; 140:103880. DOI: 10.1016/j.firesaf.2023.103880. EDN XELBMI.
16. Tarantsev A.A., Kozhevnikov D.F., Potashev D.A. The Markov model of cascade development in the fire and explosive situation in a parking lot. *Vestnik Saint-Petersburg University of State Fire Service of EMERCOM of Russia*. 2023; 4:16-25. DOI: 10.61260/2218-130X-2023-4-16-25. EDN LHASVS. (rus).
17. Zykov P.I., Kontar N.A., Subachev S.V., Subacheva A.A. About calculating of the probability of effective operation of technical equipment to ensure fire safety in determining fire risk values at production facilities. *Technosphere safety*. 2021; 4(33):67-71. EDN DHYQJX. (rus).
18. Shebeko A.Yu., Prostov E.E., Gordienko D.M., Molchanov V.P. Comparative analysis of Russian and foreign fire safety requirements to servicing and storage facilities operating gas fuel vehicles. *Fire safety*. 2019; 4(97):78-86. EDN GMRFHI. (rus).
19. Bardin A.V. Fire load modeling on the structures in ANSYS. *Construction of unique buildings and structures*. 2026; 6(45):55-67. EDN WEFDRN. (rus).
20. Timoshenko A.L., Samigullin G.Kh. Criteria model assessment of technological equipment fire hazard level in hydrogen power industry. *Problems of technosphere risk management*. 2023; 3(67):96-105. DOI: 10.61260/1998-8990-2023-3-96-105. EDN OZHONT. (rus).

Поступила 12.06.2025, после доработки 24.10.2025;
принята к публикации 05.11.2025

Received June 12, 2025; Received in revised form October 24, 2025;
Accepted November 05, 2025

Информация об авторах

ПРОСТОВ Евгений Евгеньевич, к.т.н., ведущий научный сотрудник, Всероссийский ордена «Знак Почета» научно-исследовательский институт противопожарной обороны Министерства Российской Федерации по делам гражданской обороны, чрезвычайным ситуациям и ликвидации последствий стихийных бедствий, Россия, 143903, Московская обл., г. Балашиха, мкр. ВНИИПО, 12; SPIN-код: 3075-9360; AuthorID: 954217; ORCID: 0009-0004-2914-6588; e-mail: 3.5.2@vniipo.ru

Information about the authors

Evgeny E. PROSTOV, Cand. Sci. (Eng.), Leading Researcher, All-Russian Research Institute for Fire Protection of Ministry of Russian Federation for Civil Defence, Emergencies and Elimination of Consequences of Natural Disasters, VNIIP0, 12, Balashikha, Moscow Region, 143903, Russian Federation; SPIN-code: 3075-9360; AuthorID: 954217; ORCID: 0009-0004-2914-6588; e-mail: 3.5.2@vniipo.ru

ГОРДИЕНКО Денис Михайлович, д.т.н., заместитель генерального директора по техническому регулированию, Автономная некоммерческая организация в сфере поддержки отечественных производителей «Консорциум «Производители охранных, пожарных, СКУД систем безопасности» (АНО «Консорциум ПОПСБ»), Россия, 121471, г. Москва, ул. Рябиновая, 45А, стр. 24, этаж 2, помещ. 4; AuthorID: 7003524798; ORCID: 0000-0002-5849-6956; e-mail: d_m_gordienko@mail.ru

ПРОСТОВ Евгений Николаевич, старший научный сотрудник, Всероссийский ордена «Знак Почета» научно-исследовательский институт противопожарной обороны Министерства Российской Федерации по делам гражданской обороны, чрезвычайным ситуациям и ликвидации последствий стихийных бедствий, Россия, 143903, Московская обл., г. Балашиха, мкр. ВНИИПО, 12; ScopusID: 6506573345; SPIN-код: 1752-9236; AuthorID: 1288447; ORCID: 0009-0007-1145-0241; e-mail: 3.5.2@vniipo.ru

ДОЛГИХ Дмитрий Вадимович, начальник сектора, 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; ScopusID: 6506573345; SPIN-код: 5000-9523; AuthorID: 1127069; ORCID: 0009-0002-1398-3037; e-mail: 3.5.2@vniipo.ru

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

Denis M. GORDIENKO, Dr. Sci. (Eng.), Deputy General Director for Technical Regulation, Autonomous non-profit organization in the field of support for domestic manufacturers “Consortium “Manufacturers of security, fire, ACS security systems” (ANO “Consortium of Security Services”), Ryabinovaya St., 45A, building 24, floor 2, placed. 4, Moscow, 121471, Russian Federation; AuthorID: 7003524798; ORCID: 0000-0002-5849-6956; e-mail: d_m_gordienko@mail.ru

Evgeny N. PROSTOV, Senior Researcher, All-Russian Research Institute for Fire Protection of Ministry of Russian Federation for Civil Defence, Emergencies and Elimination of Consequences of Natural Disasters, VNIIPPO, 12, Balashikha, Moscow Region, 143903, Russian Federation; ScopusID: 6506573345; SPIN-code: 1752-9236; AuthorID: 1288447; ORCID: 0009-0007-1145-0241; e-mail: 3.5.2@vniipo.ru

Dmitry V. DOLGIH, Head of the sector, All-Russian Research Institute for Fire Protection of Ministry of Russian Federation for Civil Defence, Emergencies and Elimination of Consequences of Natural Disasters, VNIIPPO, 12, Balashikha, Moscow Region, 143903, Russian Federation; ScopusID: 6506573345; SPIN-code: 5000-9523; AuthorID: 1127069; ORCID: 0009-0002-1398-3037; e-mail: 3.5.2@vniipo.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. № 6. С. 33–48
 POZHAROVZRYVOBEZOPASNOST/FIRE AND EXPLOSION SAFETY. 2025; 34(6):33-48

НАУЧНАЯ СТАТЬЯ/RESEARCH PAPER

УДК 614.842.8

<https://doi.org/10.22227/0869-7493.2025.34.06.33-48>

Разработка модели управления комплексной безопасностью на взрывопожароопасных предприятиях

Евгений Владимирович Гвоздев ✉

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

АННОТАЦИЯ

Введение. Представлено обоснование и сформировано новое направление для проведения научного исследования в области оценки организационных рисков по следующим причинам:

- организационные риски возникают и проявляются при управленческом влиянии персонала органа управления на персонал, относящийся к категории производственных структурных подразделений, т.е. природой их возникновения является информация, которая не формализована, она представляет собой качественное описание;
- организационные риски выявляются и устраняются в настоящее время автономно в отдельных видах деятельности (промышленной и пожарной безопасности, охране труда), осуществляющих контроль в отношении персонала производственных структурных подразделений как в повседневной деятельности, так и при проведении расследований по авариям (Ростехнадзор), пожарам (МЧС России), пострадавшим и погибшим (Минтруд). В отчетах отсутствует информация о недостатках работы персонала конкретного направления безопасности, в котором такой риск возник и проявился в опасное событие.

Цель и задачи. Цель состоит в разработке модели оценки организационных рисков в системе комплексной безопасности на взрывопожароопасных предприятиях на основе ортогональности систем. Представлено обоснование о целесообразности использования межотраслевого подхода, т.е. использования знаний из других научных отраслей, например из «теории автоматического управления». Разработана нормортогональная модель для оценки организационных рисков в системе комплексной безопасности на взрывопожароопасных предприятиях. Сосредоточено внимание на достоверности результатов, получаемых на основе построения ортогональных систем, представлен пример с возможностью использования модели на практике.

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 направленный вектор на ортогональной плоскости с представлением состояния системы комплексной безопасности за оцениваемый период.

Выводы. Представлено обоснование по применению группы экспертных методов и метода направленных векторов на ортогональной плоскости, использование которых позволяет получить показатели влияния направлений безопасности на общее состояние системы комплексной безопасности взрывопожароопасных предприятий. Продемонстрирован пример, позволяющий доказать адекватность использования модели на практике для оценки рисков.

Ключевые слова: направленный вектор; оценка организационных рисков; негативное воздействие; качественное влияние

Для цитирования: Гвоздев Е.В. Разработка модели управления комплексной безопасностью на взрывопожароопасных предприятиях // Пожаровзрывобезопасность/Fire and Explosion Safety. 2025. Т. 34. № 6. С. 33–48. DOI: 10.22227/0869-7493.2025.34.06.33-48

✉ Гвоздев Евгений Владимирович, e-mail: evgvozdev@mail.ru

Development of a comprehensive safety management model for explosion and fire hazardous enterprises

Evgeniy V. Gvozdev ✉

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

ABSTRACT

Introduction. The rationale is presented and a new direction in the field of organizational risk assessment is formed for the following reasons:

- organizational risks arise and manifest themselves under the managerial influence of the personnel of the management body on the personnel belonging to the category of production structural units, i.e. the nature of their occurrence is information that is characteristically described;

- organizational risks are currently being determined and eliminated independently in certain types of activities (industrial and fire safety, labour protection) that exercise control over the personnel of production structural units. Each type of activity is supervised by Rostekhnadzor, the Ministry of Emergency Situations of Russia, and the Ministry of Labour, and reports on accidents, fires, and accidents at work do not contain information about the shortcomings of personnel in a particular area of safety in which such a risk arose and manifested itself in a dangerous event.

Purpose and objectives. The aim is to develop a model for assessing organizational risks in the integrated safety system at explosion and fire hazardous enterprises based on the orthogonality of the systems. A norm orthogonal model was developed to assess organizational risks in explosion and fire hazardous enterprises. Attention is focused on the reliability of the results obtained based on the construction of orthogonal systems, and an example is presented with the possibility of using the developed model in practice.

Methods. To solve the problems, the use of expert methods is justified, which will allow converting qualitative characteristics into a quantitative measure. The use of the prioritization method used in conjunction with the Gaussian probability distribution functional is substantiated. A model is proposed, displayed on an orthogonal plane by a directional vector, which represents the state of the integrated security system over the estimated period.

Conclusions. The rationale for the application of a group of expert methods and the method of directed vectors on an orthogonal plane is presented; their use makes it possible to obtain indicators of the impact of safety trends on the overall state of the integrated safety system of explosion- and fire-hazardous enterprises. An example is shown that makes it possible to prove the adequacy of using the model in practice for risk assessment.

Keywords: directional vector; assessment of organizational risks; negative impact; qualitative impact

For citation: Gvozdev E.V. Development of a comprehensive safety management model for explosion and fire hazardous enterprises. *Pozharovzryvobezopasnost/Fire and Explosion Safety*. 2025; 34(6):33-48. DOI: 10.22227/0869-7493.2025.34.06.33-48 (rus).

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

Введение

Для различных случаев возникновения опасных событий (ОС) (аварий и пожаров), которые произошли и могут произойти на взрывопожароопасных (ВПО) предприятиях, требуется использовать риск-ориентированный подход. В настоящее время состояние комплексной безопасности на ВПО предприятиях определяется на основе результатов оценки технических, организационно-технических и организационных рисков [1]. Существенная доля (около 75 %) всех возникших организационно-технических и организационных рисков связана с человеческим фактором (ЧФ) [2, 3]. В области оценки технических и организационно-технических рисков получены результаты знаний от научных школ:

- ФГБУН ИМАШ РАН по риск-анализу и безопасности опасных производственных объектов (ОПО), которое ежегодно издает новые монографические сборники «Безопасность России», например [4–6];
- ЗАО НТЦ ПБ по обоснованию безопасности ОПО, а также по анализу риска, обоснованию и декларированию безопасности при возмездном оказании услуг в случае обращения юридических лиц [6–8];
- ФГБУ ВНИИПО по организационно-методическому обеспечению работ, связанных с независимой оценкой пожарного риска при возмездном оказании услуг в случае обращения юридических лиц [9–11];
- ФГБУ ВНИИ ГОЧС по совершенствованию способов управления рисками чрезвычайных ситуаций (ЧС) с учетом вызовов и угроз национальной безопасности России при разработке НПА и НД [12, 13].

В настоящее время для оценки *рисков* используются различные методы, например FMEA (Failure Mode and Effects Analysis) — анализ видов и последствий отказов¹, Байесовского анализа или сети Байеса². Достоинством ставшего на производстве систематизированного метода FMEA является выявление возможных отказов производственного оборудования, а также влияния этих отказов на функционирование объекта или процесса, окружающую среду и персонал. Это позволяет повысить безотказность работы производственного оборудования, снизить воздействие на окружающую среду, снизить эксплуатационные расходы и в итоге повысить деловую репутацию предприятия. Метод FMEA получил широкую известность и в использовании только при оценке *технических рисков*. Достоинством методов Байесовского анализа и сети Байеса является возможность разработать вероятностную модель Пуассона для таких событий, как аварии с представлением причинно-следственных связей между переменными в виде сети Байеса. Однако на практике методы Байесовского анализа и сети Байеса применяются редко из-за сложности построения всех взаимодействий в сложной технической системе, что может стать вычислительно неразрешимым, когда условные вероятности становятся слишком большими. Представленные методы (FMEA Байесов-

¹ ГОСТ Р 27.303–2021 (МЭК 60812:2018). Надежность в технике. Анализ видов и последствий отказов (IEC 60812–2018. Failure modes and effects analysis (FMEA and FMEGA), MOD).

² ГОСТ Р МЭК 31010–2021. Надежность в технике. Методы оценки риска (IEC 31010:2019. Risk management — Risk assessment techniques, IDT).

кого анализа или сети Байеса) имеют следующие ограничения:

- для получения результатов выходных значений при оценке рисков требуется ввод параметров эмпирических данных, представленных в количественном значении;
- по использованию векторнаправленного подхода только для представления последовательности процесса прохождения операций в промежуточных блоках.

Отличительной особенностью выбора векторнаправленного подхода для оценки *организационных рисков* (ОР) является определение отклонения базисного вектора от направления к выбранной цели, а значит возможности у органа управления откорректировать маршрут в сторону вектора достижения цели. Определенную трудность для оценки организационных рисков представляет использование исходных данных в виде информации, которая не формализована, она представляет собой качественное описание [1].

Обозначена проблемная ситуация, заключающаяся в необходимости управления организационными рисками, проявляемыми в ОС (аварии и пожары), представленные выше обстоятельства характеризуются высокой степенью актуальности. Потребовалось обосновать предпочтительность использования на практике такого подхода для оценки организационных рисков, который бы в будущем имел перспективу в совершенствовании и развитии, возможности его использования на практике. Приведен пример, обосновывающий эффективность использования предложенного подхода на практике для оценки организационных рисков [14].

Теоретическое обоснование для решения научных задач

Для решения научных задач в проводимом исследовании требуется пояснить значение словосочетания: *состояние СКБ*. Под *СКБ* следует понимать совместную деятельность направлений безопасности (ПрБ, ПБ, ОТ), осуществляющих контроль в отношении персонала ПСП, которые созданы для защиты имущества, оборудования предприятия и окружающей природной среды от аварий и пожаров [15]. Для *состояния системы* подобрано близкое по смыслу определение, взятое из ГОСТа³, в котором под анализом *состояния* метрологического обеспечения объекта понимается способ исследования *свойств* метрологического обеспечения объекта с целью выработки решений, направленных на поддержание или повышение уровня метрологического обеспечения. Под *свойствами* системы понимается совокупность *параметров* системы, определяющих ее поведение [16]. На входе для описания данной системы будут использованы характеристики описываемых организационных рисков, которым на выходе, в процессе преобразования, будут присвоены результаты, представленные в количественном значении (мере влияния) (рис. 1).

На основе анализа статистики возникновения аварий и пожаров на ВПО предприятиях сделаны выводы, что возникающие в процессе функционирования таких предприятий организационные риски целесообразно рассматривать как риски причинения

³ ГОСТ Р 8.892–2015. Государственная система обеспечения единства измерений. Метрологическое обеспечение. Анализ состояния на предприятии, в организации, объединении.

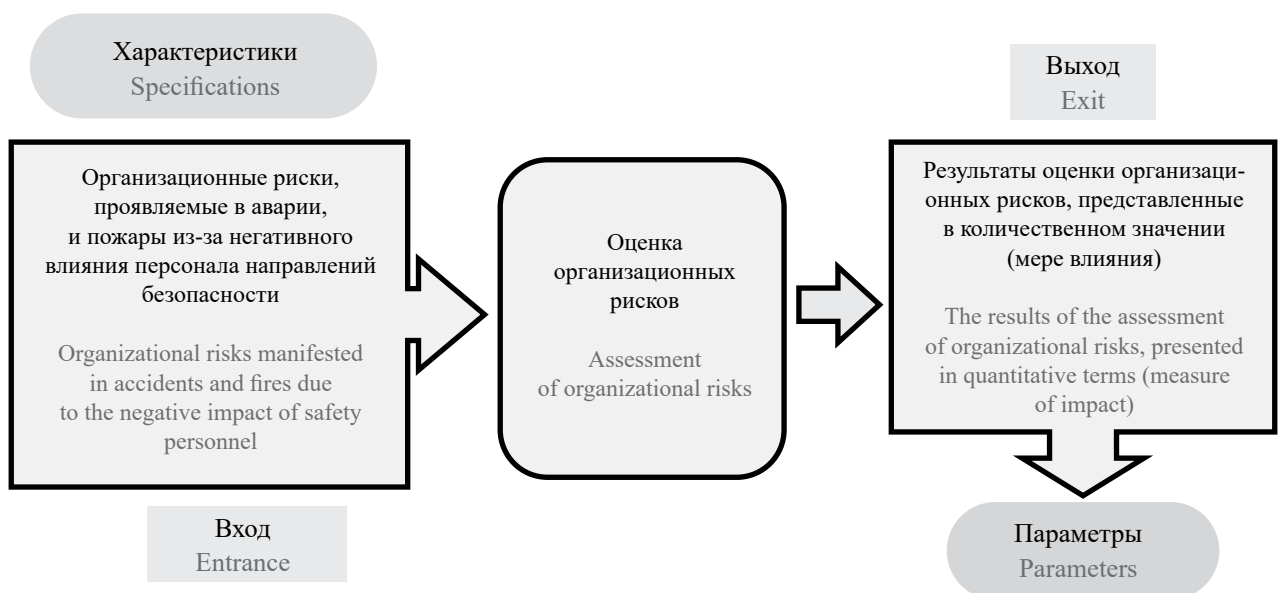


Рис. 1. Последовательность преобразования организационных рисков из качественных характеристик в параметры с числовыми значениями

Fig. 1. The sequence of transformation of organizational risks from qualitative characteristics to parameters with numerical values



Рис. 2. Подходы к построению общей методологии управления рисками
Fig. 2. Approaches to building a common risk management methodology

вреда (ущерба). Общее определение для такой категории рисков взято из Федерального закона⁴, в его содержании под *риском* причинения вреда (ущерба) предлагается рассматривать *вероятность наступления событий, следствием которых может стать причинение вреда (ущерба) различного масштаба и тяжести охраняемым законом ценностям*. В данном определении ключевым словом указывается вероятность, для определения которой целесообразно учитывать не только степень наступления некоего негативного события, но и меру негативного проявления организационных рисков в конечные события как результат *причинения вреда (ущерба) различного масштаба и тяжести*. Решение задачи, связанной с разработкой модели оценки организационных рисков, позволит учитывать динамику снижения вреда (ущербов) от ОС (аварий и пожаров) — U_{OC} , которые возникли из-за проявления рассматриваемой категории организационных рисков — R_O . Тогда:

$$\begin{aligned}
 U_{OC} &= F_{U_{OC}} \{R_O, P\} = \sum_{i=1}^n [F_{U_i}(R_{O_i}, P_i)] = \\
 &= \int_0^T C(R_O)P(R_O)dR_O = \int_0^T C(P)R_O(P)dP,
 \end{aligned}
 \quad (1)$$

где P — вероятность возникновения ОС (аварий и пожаров);

n — количество отчетов об авариях, рассматриваемых за исследуемый период;

i — группы негативных факторов, влияющих на исход в виде ОС (аварий и пожаров);
 T — период времени (месяц, квартал, год), рассматриваемый для аналитической выборки статистических данных об авариях;
 C — весовые функции, учитывающие меру негативного проявления рисков.

По результатам анализа научных результатов, представленных в научных изданиях по управлению рисками, выделяется два отличающихся друг от друга методологических подхода: *классический* и *межотраслевой* (рис. 2) [14, 17]. При *классическом* подходе для формирования характеристик данных статистики возникновения ОС устанавливается закономерность или порядок, представляющие собой логические цепочки взаимодействия данных и результатов их выходных характеристик при факторных влияниях показателей друг на друга. При *отраслевом* подходе формируются исходные посыпки в виде отправных результатов, для которых опорным описанием наблюдаемого порядка является использование фундаментальных знаний, взятых из другой области исследований. Если представленные гипотетические наработки обладают достоверностью (правильностью) и обоснованностью (доказательностью), то это означает, что получен новый научный результат [18].

В представленной последовательности (рис. 2) в качестве входных данных выступают *характеристики* в виде организационных рисков, проявляемых в ОС (аварии и пожары) и наносящих ущерб (экономический, материальный, социальный), рассматриваемый как ущерб здоровью и жизни персонала

⁴ О государственном контроле (надзоре) и муниципальном контроле в Российской Федерации : Федеральный закон от 31.07.2020 № 248-ФЗ (ст. 22).

предприятия и третьих лиц. На основе анализа статистики возникновения аварий и пожаров на ВПО предприятиях сделаны выводы, что возникающие в процессе функционирования ВПО предприятий организационные риски — R_o целесообразно рассматривать как риски причинения вреда (ущерба). Общее определение для такой категории рисков взято из Федерального закона⁴, в его содержании под *риском* причинения вреда (ущерба) предлагается рассматривать *вероятность наступления событий, следствием которых может стать причинение вреда (ущерба) различного масштаба и тяжести охраняемым законом ценностям*. В данном определении ключевым словом указывается «вероятность», для определения которой целесообразно учитывать не только степень наступления некоего негативного события, но и меру негативного проявления организационных рисков в конечные события как результат *причинения вреда (ущерба) различного масштаба и тяжести*. Решение задачи, связанной с разработкой модели оценки организационных рисков, позволит учитывать динамику снижения вреда (ущербов) от ОС (аварий и пожаров) — U_{OC} , которые возникли из-за проявления выделенной категории организационных рисков — R_o [19]. Усилиями сообщества ученых ИМАШ РАН были проведены исследования в техносферной безопасности [4], ими представлены результаты с перечнем параметров причин организационных рисков, в них выделены доли влияния с установленным значением для основных групп причин (табл. 1).

В табл. 1 выделена существенная область ($\approx 20\%$) для неизвестных групп причин организационных рисков, которые требуют изучения и конкретизации с обоснованным присвоением причины каждой группе. Автором статьи учтена специфика оценки организационных рисков в области ПрБ⁵, ПБ⁶, ОТ⁷, их рекомендовано рассматривать в двух направлениях:

- как недостаточные действия персонала направлений безопасности (ПрБ, ПБ, ОТ, ОУ ПСП), осуществляющего контроль в отношении персонала ПСП — $R_{ндд}$;
- как недоработки персонала при исполнении требований НПА и НД направлениями безопасности — $R_{нд}$.

⁵ Об утверждении Руководства по безопасности «Методические основы анализа опасностей и оценки риска аварий на опасных производственных объектах»: Приказ Ростехнадзора от 3 ноября 2022 г. № 387.

⁶ Об утверждении методики определения расчетных величин пожарного риска на производственных объектах: Приказ МЧС России от 26 июня 2024 г. № 533.

⁷ Об утверждении рекомендаций по выбору методов оценки уровней профессиональных рисков и по снижению уровней таких рисков: Приказ Минтруда России от 28.12.2021 г. № 926.

Таблица 1. Параметры причин организационных рисков
Table 1. Parameters of the causes of organizational risks

Параметр организационного риска как причина Organizational risk parameter as the reason	Доля влияния параметра The share of the parameter's influence
Неиспользование знаний Not using knowledge	0,37
Недостаток знаний Lack of knowledge	0,27
Недостаток информации Lack of information	0,13
Ошибки лица, принимающего решение Mistakes of the Decision-maker	0,09
Неизвестные ситуации Unknown situations	0,05
Прочие причины Other reasons	0,09

Показатели для выявленных новых организационных рисков — R_{O_1} и R_{O_2} за исследуемый период могут быть получены по формуле:

$$R_{O_1}(t) = \frac{\sum_{i=1}^{n_1} R_{ИДД_i}(t)}{n_1}; R_{O_2}(t) = \frac{\sum_{i=1}^{n_2} R_{ИД_i}(t)}{n_2}, \quad (2)$$

где n_1 — количество отчетов (ед.) об авариях и пожарах за рассматриваемый период с нанесенными ущербами (материальным и экономическим (руб.), социальным (пострадавшими и погибшими (чел.)); n_2 — количество отчетов (ед.) об авариях за рассматриваемый период с нанесенными ущербами (материальным и экономическим); t — рассматриваемый период (месяц, квартал, год) [20]. В качестве веса (меры) для организационных рисков $R_{O_1}(t)$ и $R_{O_2}(t)$, которые обладают свойством проявляться в ОС, предложено рассматривать условный бит (усл. бит). Места возникновения организационных рисков R_{O_1} и R_{O_2} на предприятиях НГК России (рис. 3).

Функционирующая в настоящее время комплексная безопасность на предприятиях действует как система управления с трехступенчатой всеерной структурой, связи в которой могут быть описаны математически [20]. В такой системе управления к привилегированным относятся направления безопасности (ПрБ, ПБ, ОТ), которые осуществляют контроль в отношении персонала ПСП. А деятельность руководства предприятия для достижения цели по устойчивому функционированию предприятия будет описана как:

$$F(x_1, \dots, x_N, y_1, \dots, y_N) \rightarrow \max, \quad (3)$$

где x_i — управляющие воздействия, которые выработаны органом управления предприятия по отношению к направлениям безопасности на основе

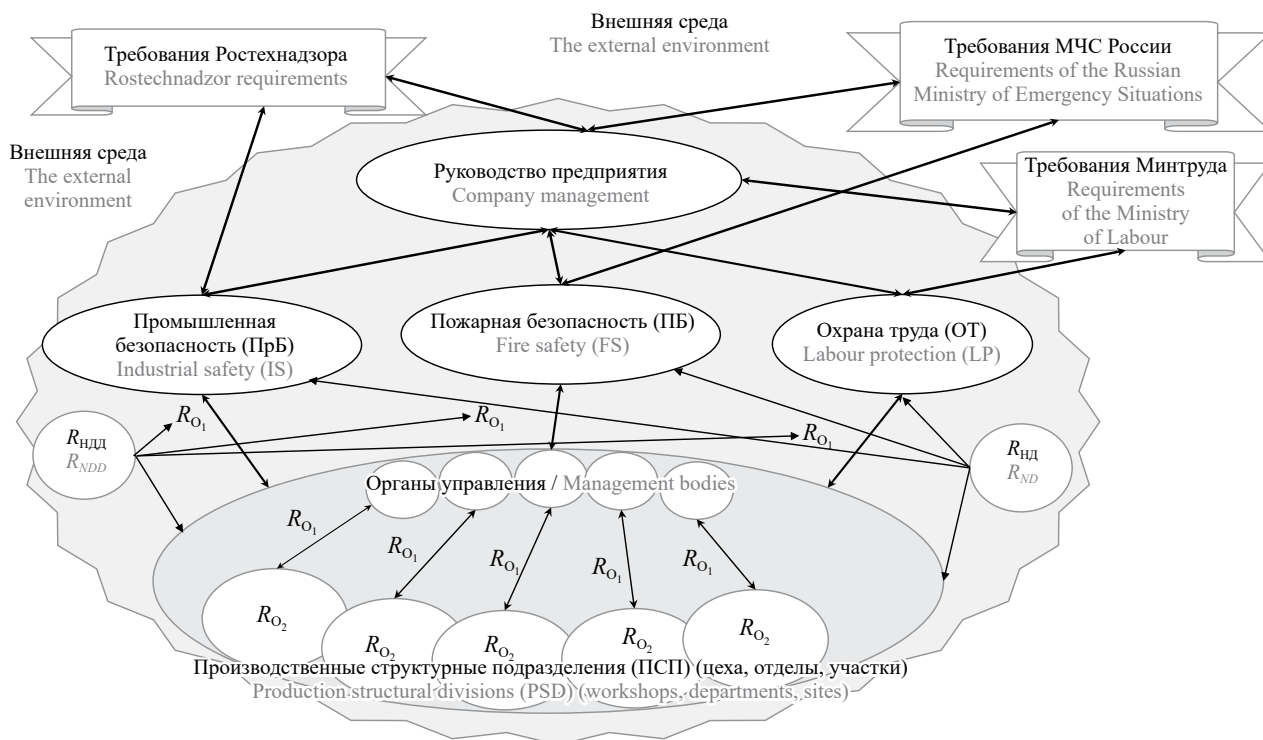


Рис. 3. Места возникновения организационных рисков R_{O_1} и R_{O_2}

Fig. 3. Locations of organizational risks R_{O_1} and R_{O_2}

интуитивных соображений. Сами же направления безопасности (ПрБ, ПБ, ОТ) в результате имеющегося в их распоряжении арсенала требований НПА и НД, узаконенных ведомствами (Ростехнадзором, МЧС России, Минтрудом и т.д.), имеют в собственном распоряжении цели — y_i . Такая связь будет представлена в виде:

$$f_i(x_i, y_i) \rightarrow \max_{i=1, \dots, N} \quad (4)$$

Таким образом, деятельность независимых направлений безопасности (ПрБ, ПБ, ОТ и т.д.) будет определяться приоритетом в достижении собственных целей — y_i , а значит пренебрежительным отношением к результатам достижения целей во взаимодействующих направлениях безопасности. Связи для органа управления и управляемых направлений безопасности (ПрБ, ПБ, ОТ и т.д.) в такой системе управления представлены на рис. 4.

Для оптимального управления в рассматриваемой иерархической системе управления предполагается иметь в виду такой выбор x_i , который бы учитывал интересы каждого из направлений безопасности (ПрБ, ПБ, ОТ и т.д.) и обеспечивал при данных значениях функции f_i (4) максимизацию целевой функции (5). Выходом из положения становится создание ОУ СКБ как промежуточного звена между 1 и 2-м уровнями управления. Тогда целевая функция руководства предприятия будет иметь вид:

$$F = F_i(x_i, y_i) \quad (5)$$

Управляющее воздействие ОУ СКБ для направлений безопасности (ПрБ, ПБ, ОТ и т.д.) будет представлено в виде:

$$f = f_i(x_1, \dots, x_k, \dots, y_1, \dots, y_k) \quad (6)$$

где $x_1, \dots, x_k, \dots, y_1, \dots, y_k$ — управляющие воздействия, которые выработаны ОУ СКБ, который уполномочен воздействовать на направления безопасности (ПрБ, ПБ, ОТ и т.д.) (рис. 5).

Целевые функции по управлению подразделениями в нижней ступени управления будут представлены в виде:

$$\varphi_{ij} = \varphi_{ij}(y_{ij}, z_{ij}), \quad i = 1, \dots, k; j = 1, \dots, N_i \quad (7)$$

где z_{ij} характеризуют деятельность в структурных подразделениях предприятий. Здесь целесообразно рассматривать в сравнении функционирующую в настоящее время комплексную безопасность в виде деятельности функционирующих автономных направлений безопасности (ПрБ, ПБ, ОТ, РС ПСП) и деятельности СКБ (рис. 4, 5). Автором статьи представлены обоснования, что созданная на ВПО предприятиях СКБ переводит безопасность на новый качественный уровень функционирования на основе *эмерджентности* (когда выявлены новые свойства при создании СКБ на ВПО предприятиях которыми ранее функционирующая система безопасности не обладала) [21].

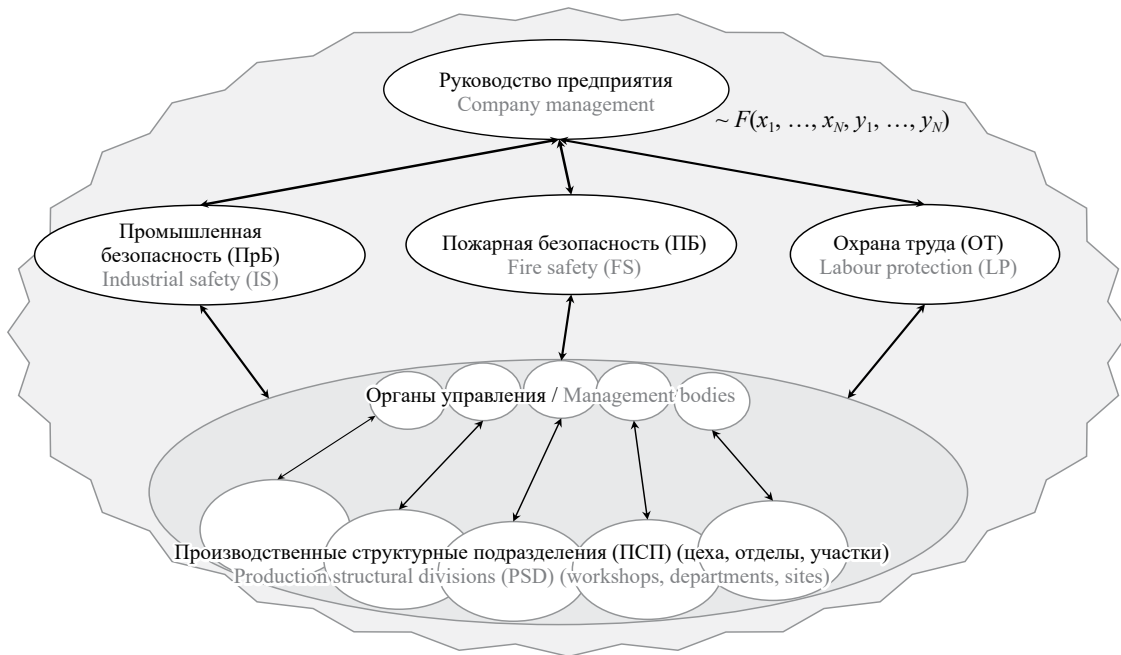


Рис. 4. Связи в существующей на предприятиях системе управления безопасностью
Fig. 4. Communications in the company's existing security management system

Все изменения, происходящие в организационных системах управления, могут быть представлены в виде траектории процесса протекания (возникновения, проявления, реализации) организационных рисков — R_0 в пространстве состояний СКБ с зонным выделением границ (рис. 6).

1. Зона, выделенная зеленым цветом, в которой все производственные процессы в технической системе

осуществляются без нарушений, относится к зоне с состоянием S_0 .

2. Зона, выделенная желтым цветом, относится к зоне возникновения организационных рисков $R_{НДД}$ и $R_{НД}$, которые при благоприятных условиях могут проявиться в опасные события (аварии или пожары), с состоянием S_0 .

3. Зона, выделенная красным цветом, в которой организационные риски $R_{НДД}$ и $R_{НД}$ стали причинами

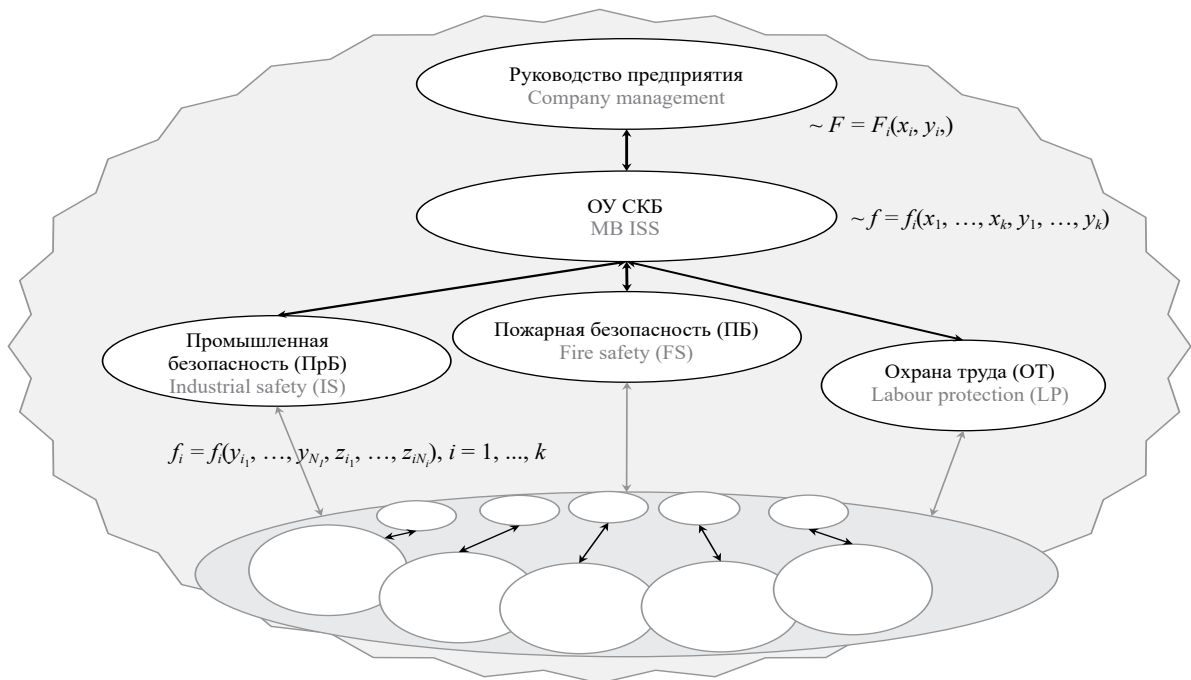


Рис. 5. Предлагаемая на предприятиях система управления безопасностью
Fig. 5. The security management system offered at the enterprise

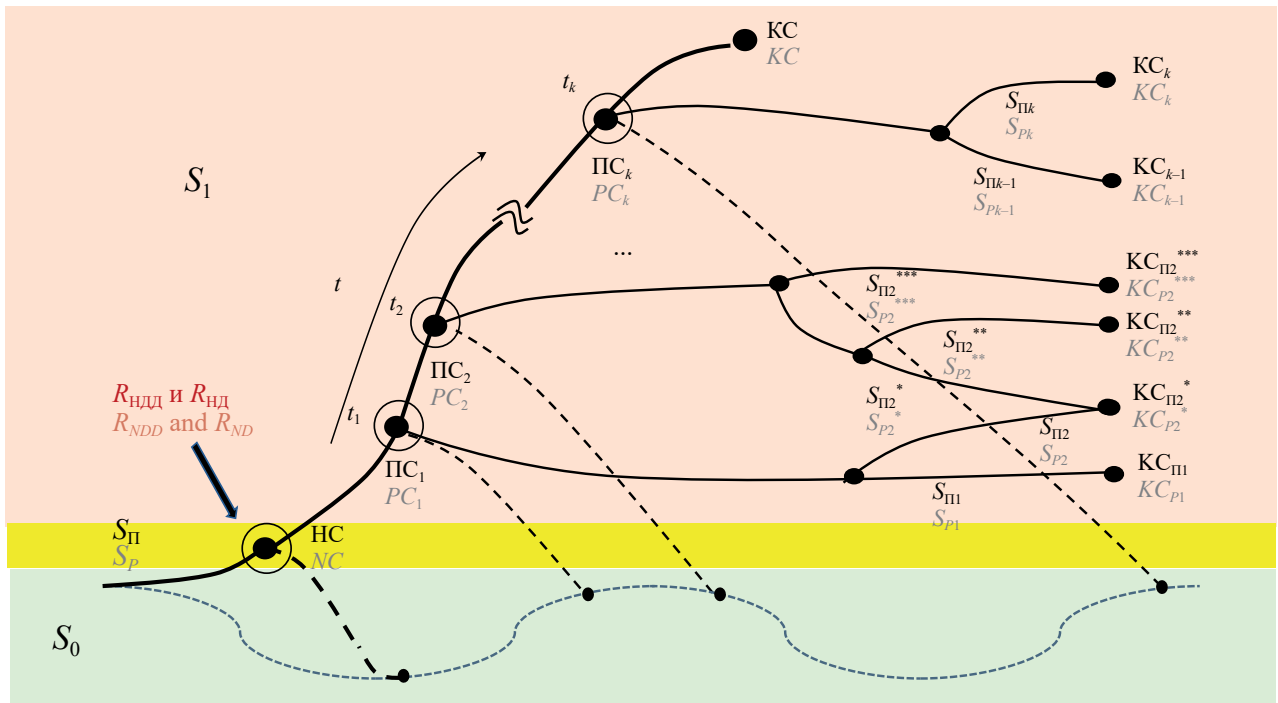


Рис. 6. Траектория с процессом возникновения и проявления организационных рисков в опасные события
 Fig. 6. A trajectory with the process of the emergence and manifestation of organizational risks in dangerous events

возникновения (аварий или пожаров), относится к зоне протекания различных сценариев нанесения ущерба от опасных событий, с состоянием S_1 . Если в организационной системе происходит начальное событие — НС, т.е. возникли организационные риски R_{HDD} и R_{HND} , были созданы условия для отклонения в направлении зоны с состоянием S_1 , то в технической системе может протекать множество разных сценариев нанесения ущерба S_{ij} . Конечное состояние KC для каждого из сценариев отличается между ними:

$$KC_{ij} \neq KC_{ij}^* \tag{8}$$

Если при возникновении инцидента, отказа *техническая* система имеет возможность вернуться из состояния S_1 в состояние S_0 за кратчайший временной промежуток, то при возникновении аварий в 20 % случаев возникают пожары, которые наносят максимальные ущербы и выводят из строя элементы технической системы на длительный срок. Здесь имеется возможность предупреждать возникновение организационных рисков в зоне с состоянием S_{Pi} , а при их проявлении с переходом в зону с состоянием S_1 (точки t_1, t_2, t_k) проводить комплекс защитных мероприятий.

Методы использования ортогональных систем для оценки организационных рисков

В теоретических основах электротехники (ТОЭ) для проведения расчетов по определению мгновенного значения таких характеристик, как ток или напря-

жение, решаются задачи с отображением на плоскости направленных векторов на основе использования метода передаточных функций (МПФ), его использование позволяет решать также задачи в области управления организационными рисками. Автором статьи уже были обоснованы подходы по использованию знаний, полученных в электротехнике для оценки рисков в организационных системах [22], для получения научного эффекта потребовалось их развитие при использовании теории ортогональности систем, описанной в работе [23]. Ортогональность часто используется в различных областях математики, например в различных преобразованиях и матрицах. Скалярным произведением функций $f(x)$ и $g(x)$, непрерывных и интегрируемых с квадратом на $[a, b]$, называется:

$$(f, g) \int_a^b \rho(x) f(x) g(x) dx, \tag{9}$$

где $\rho(x)$ — непрерывная весовая функция, отображающая показатели влияния для снижения рисков, отображенных на плоскости (a, b) , которые принадлежат пространству $L^2(R)$ с изменчивостью значений показателей отложенных на действительной шкале вещественных чисел — *Re*. При скалярном произведении будем считать справедливыми следующие свойства:

$$1) (f_1, f_2) = (f_2, f_1);$$

$$2) (\alpha_1 f_1 + \alpha_2 f_2, g) = \alpha_1 (f_1, g) + \alpha_2 (f_2, g);$$

$$3) (f, f) = \int_a^b \rho(x) f^2(x) dx \geq 0, \rho(x) > 0.$$

Функции $f(x)$ и $g(x)$ будут ортогональными, если их скалярное произведение $(f, g) = 0$. Обратной для функции ортогональности $f(x)$ будет рассматриваться нормируемая ортогональность в виде: $f(x) = \sqrt{(f, f)}$. Показателями такой функции в области управления организационными рисками является их полный набор с проявлением в опасные события (аварии и пожары). Отсюда функцией с показателями снижения рисков на плоскости (a, b) будем считать *нормируемую функцию*, при записи следующего условия для нормы $\|f(x)\| \rightarrow 1$ [24]. Функции $f(x)$ и $g(x)$ для случая полного набора всех организационных рисков, воздействующих на СКБ, и отсутствия воздействия на них со стороны направлений безопасности (ПрБ, ПБ, ОТ, ПСП) будем считать ортогональными при условии их скалярного произведения $(f, g) = 0$, а показатель, влияющий на снижение рисков $\lambda(x) > 0$, тогда:

$$(f, g) \int_a^b \frac{\lambda(x)}{1 + f(x)g(x)} dx. \quad (10)$$

Система функций $\varphi_n(x)$, $n = 1, 2, \dots$ называется ортогональной, если:

$$(\varphi_n, \varphi_m) = \begin{cases} 0, & n \neq m \\ \neq 0, & n = m \end{cases}$$

Для оценки организационных рисков примером ортогональных систем функций $\varphi_n(x) = \sin nx$, $\cos nx$ с весом $\lambda(x) \rightarrow 1$ на отрезке $[0, \frac{T}{4}]$ будет график на рис. 7.

В источнике информации по математической статистике [25] при выборке, ограниченной 3–4 ед. зависимыми показателями качественных характеристик, считается предпочтительным использовать средний показатель, отражающий типичный уровень признака, формирующийся под воздействием доминирующих неслучайных факторов, т.е. использовать нормальное распределение. Применение средних величин позволяет охарактеризовать определенный признак совокупности одним числом, несмотря на то, что у разных единиц совокупности значения признака отличны друг от друга. Учитывая наличие неопределенности при вычислении оценок исследуемых параметров по вербальной шкале, для выбора наиболее предпочтительного весового значения было принято решение использовать компромиссный подход по выбору точечных значений, полученных по закону нормального распределения. Был использован компромиссный подход, в котором учитывался факт наличия ограниченного количества организационных рисков (3–4 ед.) в подразделе с организационными

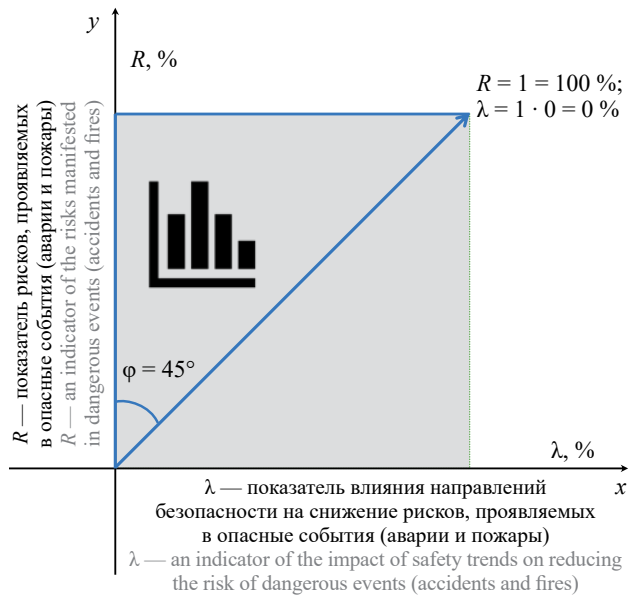


Рис. 7. График использования ортогональных систем для оценки организационных рисков
Fig. 7. Graph of the use of orthogonal systems for assessing organizational risks

причинами отчетов «Уроки, извлеченные из аварий» на предприятиях НГК России, считалось обоснованным учитывать неопределенность при вычислении оценок факторов и их весов при выборе экспертами предпочтительного решения. Считалось целесообразным использовать *шкалу отношений*, построенную на основе применения функционала действующих вероятностных законов, например распределения Гаусса, наделенного свойством проявления конкретных значений признака организационного риска для всей площади = 100 %, для ее частей, ограниченных пределами: $\bar{x} \pm \sigma = 68,2 \%$; $\bar{x} \pm 2\sigma = 95,4 \%$; $\bar{x} \pm 3\sigma = 99,6 \%$ [1]. Анализ статистики совместных опасных событий (аварий и пожаров) на ВПО предприятиях подтверждает факт возникновения и проявления организационных рисков с показателем, составляющим в среднем 20 % от общего объема выборки (рис. 8).

Необходимо вести учет первопричинных факторов возникновения и проявления организационных рисков из-за недостаточных действий и недоработок персонала направлений безопасности (ПрБ, ПБ, ОТ, ПСП). Требуется создавать систему комплексной безопасности (СКБ), для которой в настоящее время и в соответствии с законодательством РФ не определен порядок создания. Требуется использовать модели для преобразования характеристик с качественно описанными организационными рисками в параметры с их представлением в количественном виде. Перенесем область рисков, выявленных на основе статистики аварий и пожаров на ВПО предприятиях, на пространство с выделением обозначенной области ($\approx 20 \%$, рис. 7) на графике (рис. 9).

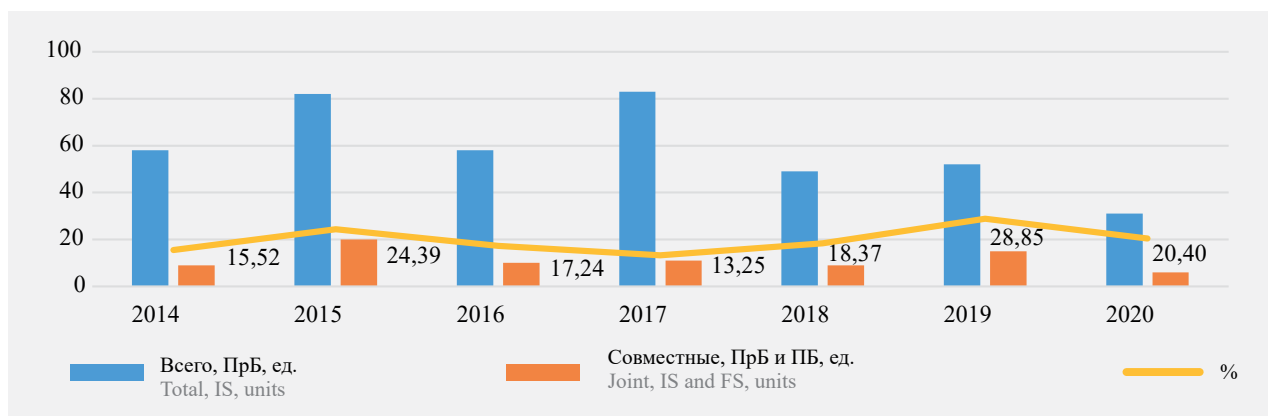


Рис. 8. Статистика аварий и пожаров на взрывопожароопасных предприятиях

Fig. 8. Statistics on accidents and fires at explosion and fire hazardous enterprises

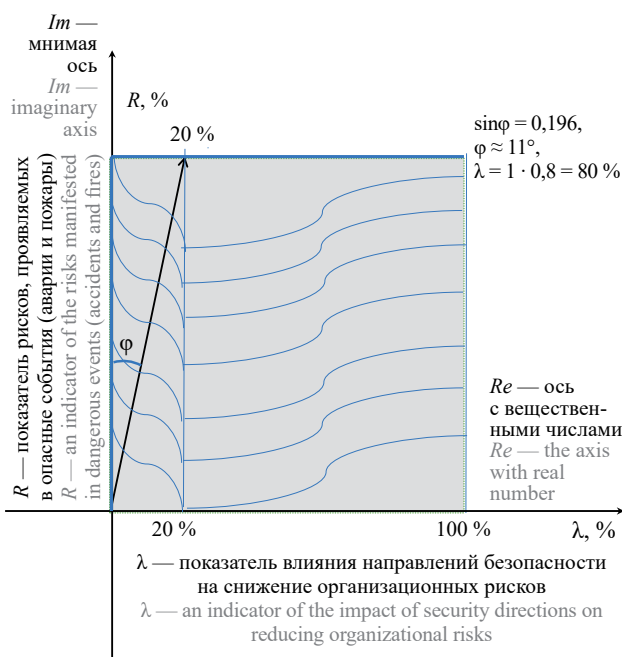


Рис. 9. Выделенная доля с рисками, проявляемыми в опасные события (аварии и пожары)

Fig. 9. The allocated share with risks manifested in dangerous events (accidents and fires)

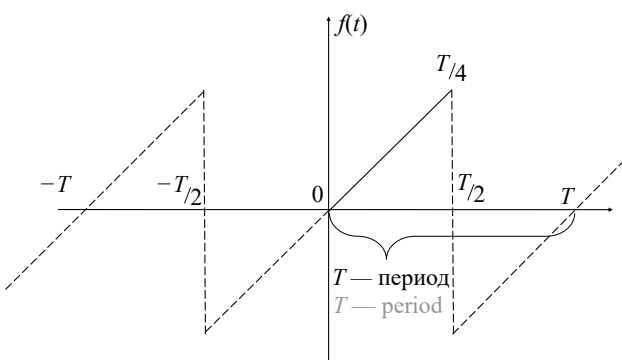


Рис. 10. Общее представление использования ортогональных систем для управления автоматизацией процессов

Fig. 10. Overview of the use of orthogonal systems for process automation management

Воспользуемся разработками с общим использованием ортогональных систем в автоматизированном управлении [26]. Общее представление об использовании ортогональных систем для управления автоматизированными системами представлено на рис. 5. Здесь целесообразно рассматривать случай, когда периодическая функция $f(t)$ будет задана направленным вектором $(0, t)$ в выделенном интервале $[0, \frac{T}{4}]$ при условии $f(t) = t$ (рис. 10). Для использования направленного вектора в решении задач по оценке организационных рисков привязывается каждый показатель влияния направлений безопасности (ПрБ, ПБ, ОТ, ПСП) к анализируемому году в виде дискретной периодической функции, т.е. нас будет интересовать интервал с отрезком $[0, \frac{T}{4}]$.

При условии $a = 1$, $b \in (0,01 - 0,99)$:

$$f_1(t) = \sum_{\lambda=0,01}^{0,99} b_\lambda \sin \lambda \frac{\pi T}{4} t, \text{ где}$$

$$b_k = \frac{4}{T} \int_0^{T/4} t \sin \lambda \frac{\pi T}{4} dt = \frac{4}{T \lambda \frac{\pi T}{4}} \left[-t \sin \lambda \frac{\pi T}{4} t \Big|_0^{T/4} + \int_0^{T/4} \sin \lambda \frac{\pi T}{4} t dt \right]$$

$$= \frac{8}{T \lambda \pi} \left[-\frac{T}{4} \sin \frac{\lambda \pi T}{4} + \frac{\lambda \pi T}{4} \sin \frac{\pi T}{4} \Big|_0^{T/4} \right]$$

$$= \frac{8}{T \lambda \pi} \left[-\frac{T}{4} \sin \frac{\lambda \pi T}{4} + \frac{T}{4} \sin \frac{\pi T}{4} \right] = \sin \frac{\pi T}{2} - \sin \frac{\lambda \pi T}{2} = 1^{(1-\lambda)},$$

где $\lambda = (0,01 - 0,99)$ — показатель эффективности влияния направления безопасности (ПрБ, ПБ, ОТ, ПСП) на общее состояние СКБ.

Такой подход дает теоретическую возможность в разработке обоснованной расчетной формулы для оценки организационных рисков за счет использования нормортогональной системы. Данное обстоятельство позволяет определять интегральный показате-

тель влияния каждого из направлений безопасности (ПрБ, ПБ, ОТ, ПСП) при условии разложения частных функций для них с привязкой к выборке за конкретный год $t = 1$ год. Тогда:

$$f(t) = \frac{f_1(t) + f_2(t) + \dots + f_n(t)}{n}$$

Пример с представлением результатов оценки организационных рисков

Для решения задачи потребовалось привлечь группу экспертов, имеющих практический опыт работы на ВПО предприятиях, состав которых бы смог обеспечить требуемое влияние суждения индивидуального эксперта на групповую оценку [27]. При обработке данных от экспертов в каждом анализируемом отчете об аварии формируются показатели (коэффициенты) негативного воздействия организационных рисков — R_0 для направлений (ПрБ, ПБ, ОТ, РС ПСП) по формуле:

$$S_i\tau = (\Delta S_1 + \dots + \Delta S_4)\tau, \tag{11}$$

где $\Delta S_1 = 4 - \sum_i \lambda_{ВЛ} S_i, i = 2, 3, 4; \Delta S_2 = 4 - \sum_i \lambda_{ВЛ} S_i, i = 1, 3, 4; \Delta S_3 = 4 - \sum_i \lambda_{ВЛ} S_i, i = 1, 2, 4; \Delta S_4 = 4 - \sum_i \lambda_{ВЛ} S_i, i = 1, 2, 3,$

Таблица 2. Соотношение результатов оценок измерений из вербальной шкалы в шкалу порядка
Table 2. The ratio of measurement evaluation results from the verbal scale to the scale of order

Вербальная шкала принадлежности направлений безопасности (ПрБ, ПБ, ОТ, ПСП) к возникновению ОС (авария и пожар) The verbal scale of belonging of the directions of safety (IS, FS, LP, PPD) to the occurrence of DE (accident and fire)	Шкала порядка на основе вероятностного распределения Гаусса при условии 100 % = 1 An order scale based on a probability distribution of Gaussian, provided 100 % = 1
Имеет непосредственное отношение It is directly related to	68,2 % = 0,682
Имеет опосредованное отношение Has an indirect relationship	27,2 % = 0,272
Имеет косвенное отношение Has an indirect relation	4,6 % = 0,046

Таблица 3. Результаты негативного воздействия направлений безопасности (ПрБ, ПБ, ОТ, ПСП) на общее состояние СКБ
Table 3. The results of the negative impact of the safety directions (IS, FS, LP, PPD) on the general condition of the ISS

Службы Services	Годы Years	2014	2015	2016	2017	2018	2019	2020	2021	2022
ОТ / LP		0,06	0,07	0,05	0,05	0,03	0,01	0,00	0,00	0,00
ПрБ / IS		0,16	0,08	0,17	0,04	0,09	0,10	0,06	0,09	0,07
ПБ / FS		0,10	0,15	0,03	0,14	0,02	0,05	0,00	0,00	0,00
ПСП / PPD		0,69	0,7	0,75	0,78	0,86	0,84	0,94	0,91	0,93

где значение 4 является суммой показателей влияния всех направлений безопасности (ПрБ, ПБ, ОТ, ПСП) для идеальной СКБ, в которой опасных событий не происходит; $\lambda_{ВЛ}$ — показатели эффективности влияния направлений безопасности (ПрБ, ПБ, ОТ, ПСП) на общее состояние СКБ — S_i , которая оценивается за выбранный (год, месяц) период — τ . Тогда значения показателей влияния для каждого направления безопасности (ПрБ, ПБ, ОТ, ПСП) — $\Delta S_i, i = 1, 2, 3, 4$, будут определяться по формуле:

$$\lambda_{ВЛ S_1}^* = (1 - K_{В03 S_1}^*); \lambda_{ВЛ S_2}^* = (1 - K_{В03 S_2}^*); \tag{12}$$

$$\lambda_{ВЛ S_3}^* = (1 - K_{В03 S_3}^*); \lambda_{ВЛ S_4}^* = (1 - K_{В03 S_4}^*),$$

где $K_{В03 S_i}^*, i = 1, 2, 3, 4$ — коэффициент негативного воздействия организационных рисков $R_{НД}$, возникших и проявившихся в ОС из-за недостаточных действий при осуществлении мероприятий по контролю направлениями безопасности (ПрБ, ПБ, ОТ) в отношении персонала ПСП.

Значения показателей влияния для каждого направления безопасности (ПрБ, ПБ, ОТ, ПСП) — $S_i^{**}, i = 1, 2, 3, 4$, будут определяться по формуле:

$$\lambda_{ВЛ S_1}^{**} = (1 - K_{В03 S_1}^{**}); \lambda_{ВЛ S_2}^{**} = (1 - K_{В03 S_2}^{**}); \tag{13}$$

$$\lambda_{ВЛ S_3}^{**} = (1 - K_{В03 S_3}^{**}); \lambda_{ВЛ S_4}^{**} = (1 - K_{В03 S_4}^{**}),$$

где $K_{В03 S_i}^{**}, i = 1, 2, 3, 4$ — показатели негативного воздействия организационных рисков — $R_{НД}$, возникших и проявившихся в ОС из-за недоработок персонала направлений безопасности (ПрБ, ПБ, ОТ, ПСП) при исполнении требований НПА и НД.

Представленная информация (рис. 5) подтверждает возможность сосредоточить внимание на те организационные риски, которые возникли в направлениях безопасности и имеют высокий коэффициент негативного воздействия [1, 22, 23]. Разработана шкала отношений для получения результатов с количественными значениями (табл. 2) [2].

Итоговое расчетное значение, представляющее собой результат работы персонала НБ (ПрБ, ПБ, ОТ, ПСП), рассчитывалось с помощью разработанной формулы (14). Получены результаты оценки деятель-

Таблица 4. Результаты влияния направлений безопасности (ПрБ, ПБ, ОТ, ПСП) на общее состояние СКБ

Table 4. The results of the influence of the safety directions (Pb, PB, OT, PSP) on the general condition of the ISS

Годы Years	2014	2015	2016	2017	2018	2019	2020	2021	2022
Службы Services									
ОТ / LP	0,31	0,31	0,32	0,32	0,32	0,33	0,33	0,33	0,33
ПрБ / IS	0,28	0,31	0,28	0,32	0,30	0,30	0,31	0,30	0,31
ПБ / FS	0,30	0,28	0,32	0,29	0,33	0,32	0,33	0,33	0,33
ПСП / PPD	0,10	0,10	0,08	0,07	0,05	0,05	0,02	0,03	0,02

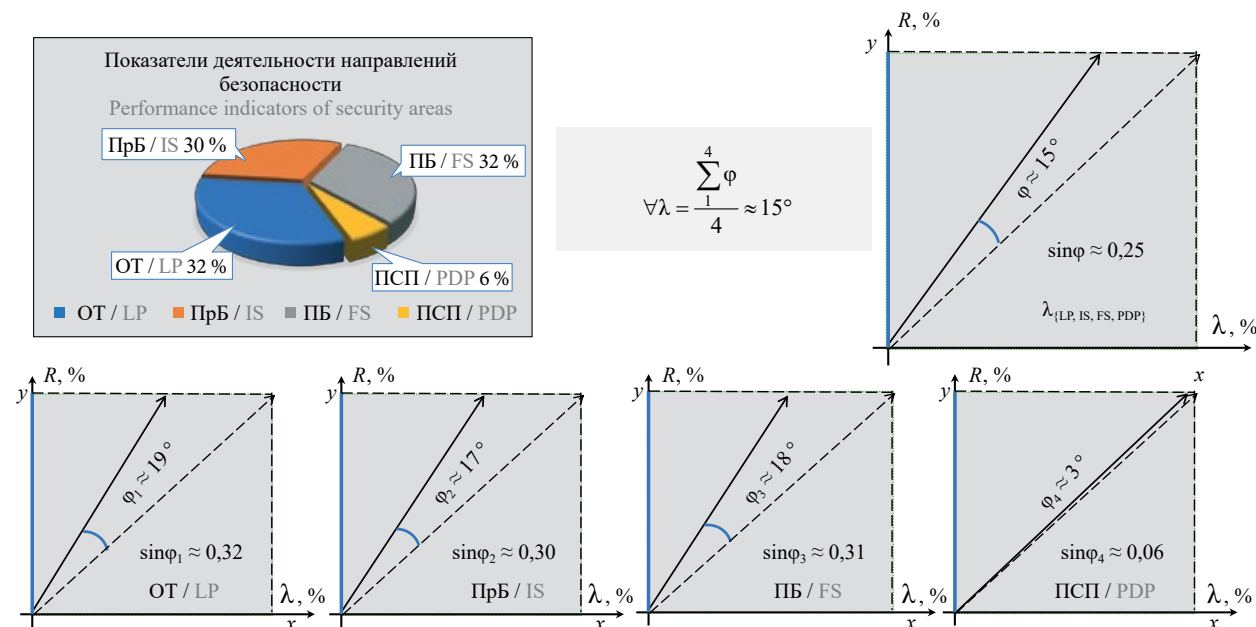
**Рис. 11.** Общий показатель деятельности направлений безопасности

Fig. 11. General indicator of the activity of security areas

ности НБ (ПрБ, ПБ, ОТ, РС ПСП), которые для каждого из них представлены в виде $K_{\text{Воз}}$ на ВПО предприятиях (табл. 3).

Показатели влияния НБ (ПрБ, ПБ, ОТ, ПСП) для повышения состояния СКБ на ВПО предприятиях рассчитывались на основе использования формулы (11), представлены выходными значениями (табл. 4).

Полученные результаты (табл. 4) могут быть представлены в виде направленного вектора, который отображает состояние СКБ за оцениваемый период (рис. 11), состояние для которой необходимо ежегодно повышать (рис. 7).

Выводы

Исследование посвящено снижению ущерба на ВПО предприятиях за счет оценки и управления организационными рисками, возникающими из-за недостаточных действий и недоработок персонала, обеспечивающего качественное функционирование СКБ. Проведен анализ ретроспективной, текущей и экспертной информации в области безопасного функционирования предприятий, аргументирована

целесообразность в научно-практической реализации риск-ориентированного подхода. При использовании векторной направленности для оценки рисков в СКБ на ВПО предприятиях появляется возможность посчитать эффект от проводимых мероприятий по снижению организационных рисков при рассмотрении общего количества аварий (рис. 10) с использованием соотношений:

$$\frac{\sin \varphi = 15 \%}{\sin \varphi = 45 \%} \cdot 100 \% = \frac{0,25}{0,707} \cdot 100 \% \approx 35 \%,$$

где эффект с показателем 35 % рассматривается в виде динамики влияния направлений безопасности на общее состояние СКБ.

Если в общей системе комплексной безопасности, имеющей множество различных (технических, организационно-технических и организационных) рисков, рассматривать наличие 100 % рисков, а для организационных рисков рассматривать около 20 % всех аварий и пожаров (рис. 7), то эффект от проводимых мероприятий по снижению организационных рисков на ВПО предприятиях будет составлять $35\%/5 = 7\%$.

Такой существенный показатель позволяет сэкономить многомиллиардные средства материально-производственного комплекса ВПО предприятий. Система СКБ, которая наделена новыми свойствами для снижения ущербов от аварий и пожаров, обладает возможностью диагностировать проблемные ситуации через оценку организационных рисков, соответственно, в оперативном порядке их выявлять и предупреждать. Представлено обоснование с перспективной возможностью развить новое направление по оценке организационных

рисков на ВПО предприятиях с помощью нормортгональной модели, данное обстоятельство позволяет выявлять и предотвращать проявление организационных рисков, а значит снижать нанесение различных ущербов (экономических, материальных, социальных) на ВПО предприятиях от аварий и пожаров. Все вышеизложенное указывает на социально-экономическую важность управления комплексной безопасностью на взрывопожароопасных предприятиях в России.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. *Гвоздев Е.В.* Оценка организационных рисков в системе комплексной безопасности на взрывопожароопасных предприятиях с использованием экспертного метода // Технологии техносферной безопасности. 2025. № 2 (108). С. 46–61. DOI: 10.25257/TTS.2025.2.108.46-61. EDN ROZXES.
2. *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. № 34 (1). С. 59–69. DOI: 10.22227/0869-7493.2025.34.01.59-69. EDN QBBVIK.
3. *Mkrtchyan L., Sansavini G., Straub U., Giachino M., Kocher T.* Insurability risk assessment of oil refineries using Bayesian Belief Networks // Journal of Loss Prevention in the Process Industries. 2022. No. 74. DOI: 10.1016/j.jlp.2021.104673. EDN UCLFFE.
4. *Абросимов Н.В., Агеев А.И., Адушкин В.В., Акимов В.А., Алешин А.В., Алешин Н.П. и др.* Безопасность России. Правовые, социально-экономические и научно-технические аспекты // Научные основы техногенной безопасности. М. : Знание, 2015. 935 с. EDN UFPJBT.
5. *Махутов Н.А., Матвиенко Ю.Г., Романов А.Н., Архипов В.Е., Ахметханов Р.С., Балашова А.В. и др.* Проблемы прочности, техногенной безопасности и конструкционного материаловедения / под ред. Н.А. Махутова, Ю.Г. Матвиенко, А.Н. Романова. М. : Ленанд., 2018. 720 с. EDN YPBGTB.
6. *Гражданкин А.И.* Анализ опасностей и оценка риска крупных аварий в нефтегазовой и угольной промышленности : дис. ... д-ра техн. наук. М., 2016. 340 с. EDN IPEFTK.
7. *Shargatov V.A., Sumskoj S.I., Pecherkin A.S.* Simulation of gas release from pipelines using a new numerical method based on the Godunov approach // Journal of Physics: Conference Series. 2019. No. 1205. P. 012050. DOI: 10.1088/1742-6596/1205/1/012050. EDN UHNXAG.
8. *Оксман В.С., Ткаченко В.М., Фоминцова А.В., Гражданкин А.И.* О методическом обеспечении совершенствования государственного надзора за состоянием промышленной безопасности на объектах ведения горных работ, металлургических производств и обращения взрывчатых материалов // Безопасность труда в промышленности. 2024. № 5. С. 26–35. DOI: 10.24000/0409-2961-2024-5-26-35. EDN USPYYF.
9. *Порошин А.А., Удавцова Е.Ю., Бобринев Е.В., Кондашов А.А., Харин В.В.* Оценка уровня пожарной опасности объектов промышленности на основе статистических методов // Безопасность труда в промышленности. 2020. № 3. С. 12–17. DOI: 10.24000/0409-2961-2020-3-12-17. EDN JFAOHU.
10. *Vishnevsky V.P., Matyushin A.V., Stel'makhova N.V.* Tax Regulation of Economic Growth in the Context of Post-Crisis Recovery: Problems and Prospects // Studies on Russian Economic Development. 2025. Vol. 36 (1). Pp. 66–76. DOI: 10.1134/S1075700724700539. EDN RSSKTK.
11. *Денисов А.Н., Порошин А.А., Данилов М.М., Власов К.С., Мешалкин Е.А., Шевцов М.В.* Генезис развития, современные реалии научно-методического и нормативного правового обоснования понятий «крупный пожар», «сложный (затяжной) пожар» // Пожаровзрывобезопасность/Fire and explosion safety. 2025. № 34 (2). С. 5–19. DOI: 10.22227/0869-7493.2025.34.02.5-19. EDN XVYUPE.
12. *Akimov V., Bedilo M., Derendiaeva O., Ivanova E., Oltyan I.* Forecast of natural emergency situations with modern methods // Reliability: Theory & Application. 2022. No. S4 (70). Pp. 71–77. DOI: 10.24412/1932-2321-2022-470-71-77. EDN NHARCO.
13. *Akimov V., Ivanova E., Oltyan I.* Statistical models for forecasting emergency situations of a biological and social character. Reliability: Theory & Applications. 2023. No. 4 (76). С. 41–45. DOI: 10.24412/1932-2321-2023-476-41-45
14. *Гвоздев Е.В.* Методология рационально-целевого развития системы комплексной безопасности на предприятиях нефтегазового комплекса России : дис. ... д-ра техн. наук. 2023. 257 с. EDN PIFCBH.
15. *Гвоздев Е.В.* Обоснование целесообразности создания системы комплексной безопасности на взрывопожароопасных предприятиях // Проблемы управления рисками в техносфере. 2024. № 4 (72). С. 102–118. DOI: 10.61260/1998-8990-2025-2024-4-102-118. EDN AVIMVQ.

16. Gvozdev E.V. A rational-targeted model for the development of an integrated safety and security system at oil and gas enterprises in Russia // *Real Estate: Economics, Management*. 2023. No. 1. Pp. 33–38. DOI: 10.22337/2073-8412-2023-1-33-38. EDN TBGRUN.
17. 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). Pp. 1–25. DOI: 10.1145/3569458
18. Воронин А.А., Губко М.В., Мишин С.П., Новиков Д.А. Математические модели организаций : уч. пос., изд. 2-е, стереотип. М. : ЛЕНАНД, 2019. 360 с.
19. Гвоздев Е.В. Анализ критериев и методов оценки организационных рисков на взрывопожароопасных предприятиях // *Безопасность труда в промышленности*. 2025. № 7. С. 48–55. DOI: 10.24000/0409-2961-2025-7-48-55. EDN BBJSON.
20. Моисеев Н.Н. Математические задачи системного анализа : уч. пос., изд. 3-е, доп. // *Синергетика: от прошлого к будущему*. М. : Книжный дом «ЛИБРОКОМ», 2013. № 55. 532 с.
21. D'Este P., Robinson-García N. Interdisciplinary research and the societal visibility of science: The advantages of spanning multiple and distant scientific fields // *Research Policy*. 2023. No. 52 (2). P. 104609. DOI: 10.1016/j.respol.2022.104609. EDN YSGENA.
22. Гапанович И.В., Лантева У.В., Николаева Д.Р. Математические основы информационных систем : уч. пос. Тюмень : Тюменский индустриальный университет, 2020. 295 с. EDN FPGSSG.
23. Гвоздев Е.В. Управление комплексной безопасностью предприятий нефтегазового комплекса России с использованием метода комплексных чисел // *Безопасность труда в промышленности*. 2023. № 5. С. 46–51. DOI: 10.24000/0409-2961-2023-5-46-51. EDN ENTDND.
24. Благовещенская Е.А., Гарбарук В.В., Родин В.И. Математические модели динамических звеньев : практикум по моделированию. СПб. : Петербургский государственный университет, 2021. 38 с. EDN GKTNIA.
25. Сизова Т.М. Статистика : учеб. пос. СПб. : СПб НИУ ИТМО, 2013. 176 с. URL: <https://books.ifmo.ru/file/pdf/1332.pdf>
26. Будин В.И. Математические основы автоматики и управления : уч. пос. для студентов технических ВУЗов. Самара : Самарский государственный технический университет, 2016. 119 с. URL: https://rusneb.ru/catalog/000200_000018_RU_NLR_BIBL_A_011274364/?ysclid=mj6hxp1xu179220627
27. Androshchuk A., Yevseiev S., Melenchuk V., Lemeshko O., Lemeshko V. Improvement of project risk assessment methods of implementation of automated information components of non-commercial organizational and technical systems // *Eureka: Physics and Engineering*. 2020. No. 1. Pp. 48–55. DOI: 10.21303/2461-4262.2020.001131. EDN GYWITG.
28. Кабанов Е.И. Экспертная система для комплексной экспресс-оценки и прогноза риска аварий и профессиональных рисков на угольных шахтах // *Горный информационно-аналитический бюллетень : научно-технический журнал*. 2019. № S7. С. 78–86. DOI: 10.25018/0236-1493-2019-4-7-78-86. EDN ZUKIOD.
29. Unver S., Ergenc I. Safety risk identification and prioritize of forest logging activities using analytic hierarchy process (AHP) // *Alexandria Engineering Journal*. 2021. No. 60 (1). Pp. 1591–1599. DOI: 10.1016/j.aej.2020.11.012. EDN JQZEVU.

REFERENCES

1. Gvozdev E.V. Assessment of organizational risks in the integrated safety system at explosion- and fire-hazardous enterprises using the expert method. *Technology of technosphere safety*. 2025; 2(108):46-61. DOI: 10.25257/TTS.2025.2.108.46-61. EDN ROZXES. (rus).
2. 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. *Pozharovzryvobezопасnost'/Fire and explosion safety*. 2025; 34(1):59-69. DOI: 10.22227/0869-7493.2025.34.01.59-69. EDN QBBBIK. (rus).
3. Mkrtchyan L., Sansavini G., Straub U., Giachino M., Kocher T. Insurability risk assessment of oil refineries using Bayesian Belief Networks. *Journal of Loss Prevention in the Process Industries*. 2022; 74:104673. DOI: 10.1016/j.jlp.2021.104673. EDN UCLFFE.
4. Abrosimov N.V., Ageev A.I., Adushkin V.V., Akimov V.A., Aleshin A.V., Aleshin N.P. et al. Security of Russia. Legal, socio-economic and scientific-technical aspects. *Scientific foundations of technogenic safety*. Moscow, Znanie, 2015; 935. EDN UFPJBT. (rus).
5. Makhutov N.A., Matvienko Yu.G., Romanov A.N., Arkhipov V.E., Akhmetkhanov R.S., Balashova A.V. et al. *Problems of Strength, Technogenic Safety, and Structural Materials Science* / ed. by N.A. Makhutov, Yu.G. Matvienko, A.N. Romanov. Moscow, Lenand, 2018; 720. EDN YPBGTB. (rus).
6. Grazhdankin A.I. *Hazard analysis and risk assessment of major accidents in the oil, gas and coal industries : dissertation for the degree of Doctor of Technical Sciences*. Moscow, 2016; 340. EDN YPBGTB. (rus).

7. Shargatov V.A., Sumskoï S.I., Pecherkin A.S. Simulation of gas release from pipelines using a new numerical method based on the Godunov approach. *Journal of Physics: Conference Series*. 2019; 1205:012050. DOI: 10.1088/1742-6596/1205/1/012050. EDN UHNXAG.
8. Oxman V.S., Tkachenko V.M., Fomintsova A.V., Grazhdankin A.I. On the methodological support for improvement of the state supervision over industrial safety conditions at objects of mining, metallurgical production, and explosive in use. *Occupational safety in industry*. 2024; 5:26-35. DOI: 10.24000/0409-2961-2024-5-26-35. EDN USPYFF. (rus.).
9. Poroshin A.A., Udavtsova E.Yu., Bobrinev E.V., Kondashov A.A., Kharin V.V. Assessment of fire hazard level of industrial objects based on the statistic methods. Assessment of the fire hazard level of industrial facilities based on statistical methods. *Occupational safety in industry*. 2020; 3:12-17. DOI: 10.24000/0409-2961-2020-3-12-17. EDN JFAOHU. (rus).
10. Vishnevsky V.P., Matyushin A.V., Stel'makhova N.V. Tax Regulation of Economic Growth in the Context of Post-Crisis Recovery: Problems and Prospects. *Studies on Russian Economic Development*. 2025; 36(1):66-76. DOI: 10.1134/S1075700724700539. EDN RSSKTK.
11. Denisov A.N., Poroshin A.A., Danilov M.M., Vlasov K.S., Meshalkin E.A., Shevtsov M.V. Genesis of development, modern realities of scientific, methodological and normative legal substantiation of the concepts of "large fire", "complex (protracted) fire". *Pozharovzryvbezopasnost/Fire and explosion safety*. 2025; 34(2):5-19. DOI: 10.22227/0869-7493.2025.34.02.5-19. EDN XVYUPE. (rus).
12. Akimov V., Bedilo M., Derendiaeva O., Ivanova E., Oltyan I. Forecast of natural emergency situations with modern methods. *Reliability: Theory & Application*. 2022; S4(70):71-77. DOI: 10.24412/1932-2321-2022-470-71-77. EDN HHARCO. (rus.).
13. Akimov V., Ivanova E., Oltyan I. Statistical models for forecasting emergency situations of a biological and social character. *Reliability: Theory & Applications*. 2023; 4(76):41-45. DOI: 10.24412/1932-2321-2023-476-41-45
14. Gvozdev E.V. Methodology of rational-targeted development of an integrated security system at enterprises of the oil and gas complex of Russia : *dissertation for the degree of Doctor of Technical Sciences*. 2023; 257. EDN PIFCBH. (rus).
15. Gvozdev E.V. Justification of the expediency of creating an integrated safety system at explosive and fire-hazardous enterprises. *Problems of technosphere risk management*. 2024; 4(72):102-118. DOI: 10.61260/1998-8990-2025-2024-4-102-118. EDN AVIMVQ. (rus).
16. Gvozdev E.V. A rational-targeted model for the development of an integrated safety and security system at oil and gas enterprises in Russia. *Real Estate: Economics, Management*. 2023; 1:33-38. DOI: 10.22337/2073-8412-2023-1-33-38. EDN TBGRUN.
17. 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):1-25. DOI: 10.1145/3569458
18. Voronin A.A., Gubko M.V., Mishin S.P., Novikov D.A. Mathematical models of organizations : *textbook, 2nd ed., stereotype*. Moscow, LENAND, 2019; 360. (rus).
19. Gvozdev E.V. Analysis of organizational risk and assessment methods at explosion- and fire-hazardous enterprises. *Occupational safety in industry*. 2025; 7:48-55. DOI: 10.24000/0409-2961-2025-7-48-55. EDN BBJSON. (rus).
20. Moiseev N.N. Mathematical Problems of Systems Analysis : a Tutorial, 3rd ed., suppl. *Synergetics: from past to future*. Moscow, LIBROKOM Book House, 2013; 532:55. (rus).
21. D'Este P., Robinson-García N. Interdisciplinary research and the societal visibility of science: The advantages of spanning multiple and distant scientific fields. *Research Policy*. 2023; 52(2):104609. DOI: 10.1016/j.respol.2022.104609. EDN YSGENA.
22. Gapanovich I.V., Lapteva U.V., Nikolaeva D.R. Mathematical Foundations of Information Systems : *a Tutorial*. Tyumen, Tyumen Industrial University, 2020; 295. EDN FPGSSG. (rus).
23. Gvozdev E.V. Integrated safety management of Russian oil and gas enterprises using the complex numbers method. *Occupational safety in industry*. 2023; 5:46-51. DOI: 10.24000/0409-2961-2023-5-46-51. EDN ENTDND. (rus).
24. Blagoveshchenskaya E.A., Garbaruk V.V., Rodin V.I. Mathematical models of dynamic links : *Modeling workshop*. St. Petersburg, Petersburg State University, 2021; 38. EDN GKTNIA. (rus).
25. Sizova T.M. Statistics : *a textbook*. St. Petersburg, St. Petersburg National Research University ITMO, 2013; 176. URL: <https://books.ifmo.ru/file/pdf/1332.pdf> (rus).
26. Budin V.I. Mathematical Foundations of Automation and Control : *a Textbook for Students of Technical Universities*. Samara, Samara State Technical University, 2016; 119. URL: https://rusneb.ru/catalog/000200_000018_RU_NLR_BIBL_A_011274364/?ysclid=mj6xxp1xu179220627
27. Androshchuk A., Yevseiev S., Melenchuk V., Lemeshko O., Lemeshko V. Improvement of project risk assessment methods of implementation of automated information components of non-commercial organizational and technical systems. *Eureka: Physics and Engineering*. 2020; 1:48-55. DOI: 10.21303/2461-4262.2020.001131. EDN GYWITG.

28. Kabanov E.I. Expert system for the comprehensive express assessment of risk of accidents and occupational risks in coal mines. *Mining information and Analytical Bulletin : Scientific and Technical Journal*. 2019; S7:78-86. DOI: 10.25018/0236-1493-2019-4-7-78-86. EDN ZUKIOD. (rus).
29. Unver S., Ergenc I. Safety risk identification and prioritize of forest logging activities using analytic hierarchy process (AHP). *Alexandria Engineering Journal*. 2021; 60(1):1591-1599. DOI: 10.1016/j.aej.2020.11.012. EDN JQZEVU.

Поступила 28.06.2025, после доработки 22.11.2025;

принята к публикации 24.11.2025

Received June 28, 2025; Received in revised form November 22, 2025;

Accepted November 24, 2025

Информация об авторе

ГВОЗДЕВ Евгений Владимирович, к.т.н., доцент, доцент кафедры механизации, автоматизации и роботизации строительства, Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет, Россия, 129337, г. Москва, Ярославское шоссе, 26; SPIN-код: 5787-2465; ORCID: 0000-0002-3679-1065; e-mail: evgvozdev@mail.ru

Information about the author

Yevgeniy V. GVOZDEV, Cand. Sci. (Eng.), Associate Professor, Associate Professor of the Department of Mechanization, Automation and Robotization of Construction, National Research Moscow State University of Civil Engineering, Yaroslavskoye Shosse, 26, Moscow, 129337, Russian Federation; SPIN-code: 5787-2465; ORCID: 0000-0002-3679-1065; e-mail: evgvozdev@mail.ru

Интеграция методов менеджмента качества для решения задач управления безопасностью продукции

Юрий Сергеевич Клочков ✉, Андрей Михайлович Тверяков, Никита Олегович Коваль

Тюменский индустриальный университет (ТИУ), г. Тюмень, Россия

АННОТАЦИЯ

Введение. Мониторинг качества продукции является сегодня одной из наиболее важных задач, так как иначе невозможно гарантировать как выпуск конкурентоустойчивой продукции, так и обеспечить заданный уровень безопасности. Но сегодня отсутствуют работы, связанные с анализом такой системы мониторинга, оценкой ее соответствия, адекватности и адаптированности к конкретным производственным задачам.

Цель и задачи. Стандартизация системы мониторинга методов менеджмента качества для повышения эффективности интеллектуальной поддержки принятия управленческих решений в организационных системах за счет решения задач интеграции методов менеджмента качества и оценки валидности системы мониторинга качества продукции.

Методы исследования. Анализ практики применения методов менеджмента качества, математического моделирования применения нескольких методов управления качеством конкурирующих за одни и те же управленческие ресурсы, оценка возможности и примеры интеграции методов между собой для решения задачи грамотной трансляции информации от одного метода к другому.

Заключение. Современные системы мониторинга качества продукции должны отвечать требованиям системности, а именно: целостности, эмерджентности, адаптированности, доступности и другим. Иначе применение методов и специализированных программных продуктов не приведет к повышению качества продукции, обеспечению ее конкурентоустойчивости и соответствия требованиям безопасности.

Ключевые слова: QFD; FMEA; управление рисками; закон Вебера – Фехнера; дымогазонепроницаемые двери

Благодарности. Работа выполнена в рамках гранта РФФИ по Соглашению между Российским научным фондом, руководителем проекта и организацией о представлении гранта на проведение фундаментальных научных исследований и поисковых научных исследований № 25-19-00898 от 27.05.2025.

Для цитирования: Клочков Ю.С., Тверяков А.М., Коваль Н.О. Интеграция методов менеджмента качества для решения задач управления безопасностью продукции // Пожаровзрывобезопасность/Fire and Explosion Safety. 2025. Т. 34. № 6. С. 49–57. DOI: 10.22227/0869-7493.2025.34.06.49-57

✉ Клочков Юрий Сергеевич, e-mail: y.kloch@mail.ru

Integration of quality management methods for solving product safety management tasks

Yury S. Klochkov ✉, Andrey M. Tveryakov, Nikita O. Koval

Industrial University of Tyumen (TIU), Tyumen, Russian Federation

ABSTRACT

Introduction. Product quality monitoring is an important task today, because it is impossible to guarantee the production of competitive products and to ensure a given level of safety. Nowadays there are no studies analyzing such a monitoring system or assessing its compliance, adequacy, and adaptability to specific production tasks.

Goals and objectives. The aim is to standardize the quality management methods monitoring system to improve the effectiveness of intelligent decision support in organizational systems. This can be achieved by integrating quality management methods and assessing the validity of the product quality monitoring system.

Methods. Analysis of the practical use of quality management methods, mathematical modelling of several quality management methods competing for the same management resources, and feasibility evaluation and examples of integration techniques to solve the problem of transferring information from one method to another.

Conclusions. Modern product quality monitoring systems have to meet the requirements of consistency, such as integrity, emergence, adaptability, accessibility, and other factors. Otherwise, the use of methods and specialized software would not improve product quality, ensure its competitiveness and compliance with safety requirements.

Keywords: QFD; FMEA; risk management; Weber – Fechner law; smoke- and gas-tight doors

Acknowledgements. The research was financed as part of the grant from the Russian Science Foundation under Agreement between the Russian Science Foundation, the project manager, and the organization of a grant for fundamental scientific research and exploratory scientific research No. 25-19-00898 dated May 27, 2025.

For citation: Klochkov Yu.S., Tveryakov A.M., Koval N.O. Integration of quality management methods for solving product safety management tasks. *Pozharovzryvobezопасnost/Fire and Explosion Safety*. 2025; 34(6):49-57. DOI: 10.22227/0869-7493.2025.34.06.49-57 (rus).

✉ Yury Sergeevich Klochkov, e-mail: y.kloch@mail.ru

Введение

Решение задач управления безопасностью продукции охватывает весь цикл создания, эксплуатации и утилизации продукции. На каждом этапе, начиная уже с проектирования, применяются методы менеджмента качества [1, 2], цель которых — обеспечение максимальной эффективности и результативности конкретного этапа жизненного цикла продукции [3, 4]. Так, например, на этапах разработки продукции применяется методология развертывания функций качества, которая позволит перейти от ожиданий потребителя к конкретным техническим характеристикам продукции [5, 6]. Далее зарекомендовал себя анализ рисков и последствий потенциальных несоответствий (FMEA), который учитывает опыт экспертов, статистические оценки и тренды, позволяет обнаружить и устранить риски эксплуатации продукции, а также влияет на сроки изготовления [7, 8]. На этапах производства применяются методы контроля качества продукции, которые позволяют обнаруживать брак, а также управлять производственным процессом в реальном режиме времени, но без применения QFD это невозможно [9].

Но возникает проблема в том, что методы менеджмента качества должны работать синхронно. Любой из семи методов контроля качества, либо управления качеством самостоятельно может показать очень неплохие результаты [10], но если их не увязать в единую систему мониторинга качества выпускаемой продукции, то можно получить обратный эффект. Например, индексы воспроизводимости C_p и C_{pk} при анализе производственных процессов в случае, когда значения выше чем 1,66, демонстрируют высокое качество технологических операций [11], но при этом контрольные карты Шухарта могут показывать, что технологическая операция статистически неуправляема, тогда как нужно принять решение о качестве конкретной технологической операции, какой из методов должен быть в приоритете. То есть возникает задача валидации системы методов управления качеством.

Цель и задачи исследования

Стандартизация системы мониторинга методов менеджмента качества для повышения эффективности интеллектуальной поддержки принятия управленческих решений в организационных системах

за счет решения задач интеграции методов менеджмента качества и оценки валидности системы мониторинга качества продукции.

Методы исследования

Нужно отметить, что применение методов менеджмента качества всегда будет сопровождаться передачей части управленческих решений от руководства персоналу на местах [12]. Это связано с тем, что потребуются соответствующим образом собирать информацию о качестве, например метрологическую, статистическую, за счет проведения наблюдений, фиксации данных и их структурирования. Даже вопрос группирования данных очень серьезным образом может повлиять на построение контрольных карт Шухарта, а следовательно, на результаты принятия решений [13]. Кроме того, любой метод менеджмента качества потребует дополнительного времени и знаний, т.е. понадобится выделить соответствующие ресурсы для его эффективного применения, например, приобретение соответствующего пакета прикладных программ и обучение пользованию им [14]. То есть, с одной стороны, внедрение методов менеджмента качества повышает самоорганизацию, с другой, требует дополнительных условий для правильного внедрения новых методов управления. Поэтому так важно, чтобы методы менеджмента качества были интегрированы друг с другом.

Рассмотрим математическую модель взаимодействия методов менеджмента качества на основе моделей Лотки – Вольтера [15, 16]. Данные модели часто используют для анализа нескольких конкурентов. Составим систему дифференциальных уравнений:

$$\begin{cases} \frac{d\varphi_1}{dt} = C_1\varphi_1 + a_{12}\varphi_1\varphi_2 + a_{11}\varphi_1^2 \\ \frac{d\varphi_2}{dt} = C_2\varphi_2 + a_{21}\varphi_1\varphi_2 + a_{22}\varphi_2^2 \end{cases},$$

где $\varphi_1(t)$ и $\varphi_2(t)$ — характеризуют затрачиваемые ресурсы, в том числе управленческие в конкретный момент времени t .

Если $C_i > 0$, то внимание к соответствующему методу менеджмента качества растет, если $C_i < 0$, то уменьшается. $a_{ii}\varphi_i^2$ в данной системе уравнений отвечает за оценку конкуренции методов менеджмента качества между собой, если $a_{ii} > 0$, то мы доби-

лись, что методы интегрированы, благоприятно влияют на развитие выпускаемой продукции. Если же a_{ii} отрицательны, то методы менеджмента качества конфликтуют между собой и конкурируют за управленческие ресурсы. Если $a_{12} > 0$ и $a_{21} > 0$, то один из методов менеджмента качества основывается на результатах работы предыдущего.

Результаты и обсуждение

Развертывание функций качества (QFD, рис. 1) нацелено на обеспечение конкурентноустойчивого производства [17], поэтому сначала проводится детальный анализ пожеланий потребителей, показателей конкурентов и требований ГОСТов, а затем проектируется система производства.

Нужно сказать, что QFD уже интегрирует в себе несколько методов менеджмента качества, например квалитметрию, стратификацию и т.д. При этом развитие методов квалитметрии как отдельной науки не учитывается при QFD. Следовательно, расчет значимости характеристик продукции осуществляется неверно. В качестве рекомендаций предложим учет закона Вебера – Фехнера при указанных расчетах, а также стоит понимать, какие методы менеджмента качества будут применяться для обеспечения нужных характеристик, что как раз и станет основой для построения грамотной, комплексной системы мониторинга качества выпускаемой продукции.

Учет закона Вебера – Фехнера стоит делать в том случае, когда потребитель использует органолептические методы оценки качества продукции. Тогда при QFD необходимо линейные оценки характеристик заменить на логарифмические, что соответствует оценкам интенсивности ощущений на раздражителя. Кроме того, отметить, что потребитель-пользователь, в отличие от потребителя-профессионала, совершенно иначе подходит к суждениям о качестве продукции.

Если ожидание потребителя зависит только от одной характеристики, то можно записать такое уравнение:

$$K_{\text{потр.пол}} = K \cdot \ln \left(\frac{P_{\text{хар.прод}}}{P_{\text{нач}}} \right),$$

где K — константа конкретной характеристики продукции, степень ее влияния на ощущения потребителя-пользователя;

$P_{\text{хар.прод}}$ — величина конкретной характеристики продукции;

$P_{\text{нач}}$ — величина конкретной характеристики продукции, при которой оценка качества будет нулевой или минимальной.

Фактически предлагается с точки зрения квалитметрии изменить правила оценки, оставив при этом

ту же базу сравнения и предмет исследования. Новые правила оценки коренным образом изменят значимость каждой характеристики продукции, что позволит комплексно обеспечить конкурентоустойчивость продукции на рынке.

Таким образом, интеграция новых подходов в квалитметрическом анализе с существующими методами развертывания функций качества позволяет принципиально по новому оценивать продукцию, учитывать мнения потребителя-пользователя для обеспечения конкурентоустойчивости продукции.

Рассматривая следующий основной метод управления качеством — анализ видов и последствий потенциальных несоответствий, — согласимся с тем, что его практика применения и адаптации к современным технологиям производства проходит гораздо быстрее и эффективнее [18]. Способствует этому развитие международного стандарта ISO 9001¹, в котором риск-ориентированный подход поставлен как основной. Тем не менее при расчетах приоритетного числа рисков до сих пор не учитывают их взаимовлияние, что для обеспечения безопасности продукции является серьезной недоработкой.

Нежелательные события, которые возникают при чрезвычайных ситуациях, динамически меняют свои оценки вероятности возникновения и возможности обнаружения, что явно нелинейно отражается на расчетах приоритетного числа риска, а также оценки последствий данных событий. Предложенные модели оценки одновременно происходящих нежелательных событий можно строить по-разному, но фактически все сведется к формуле расчета приоритетного числа риска при анализе зависимых несоответствий, их причин, либо последствий:

$$\text{ПЧР}_{\text{зав.соб}} = \prod_{i=1}^n \text{П}^{\text{макс}}; \text{Ч}_i; \text{O}_i,$$

где $\text{ПЧР}_{\text{зав.соб}}$ — приоритетное число риска зависящего нежелательного события;

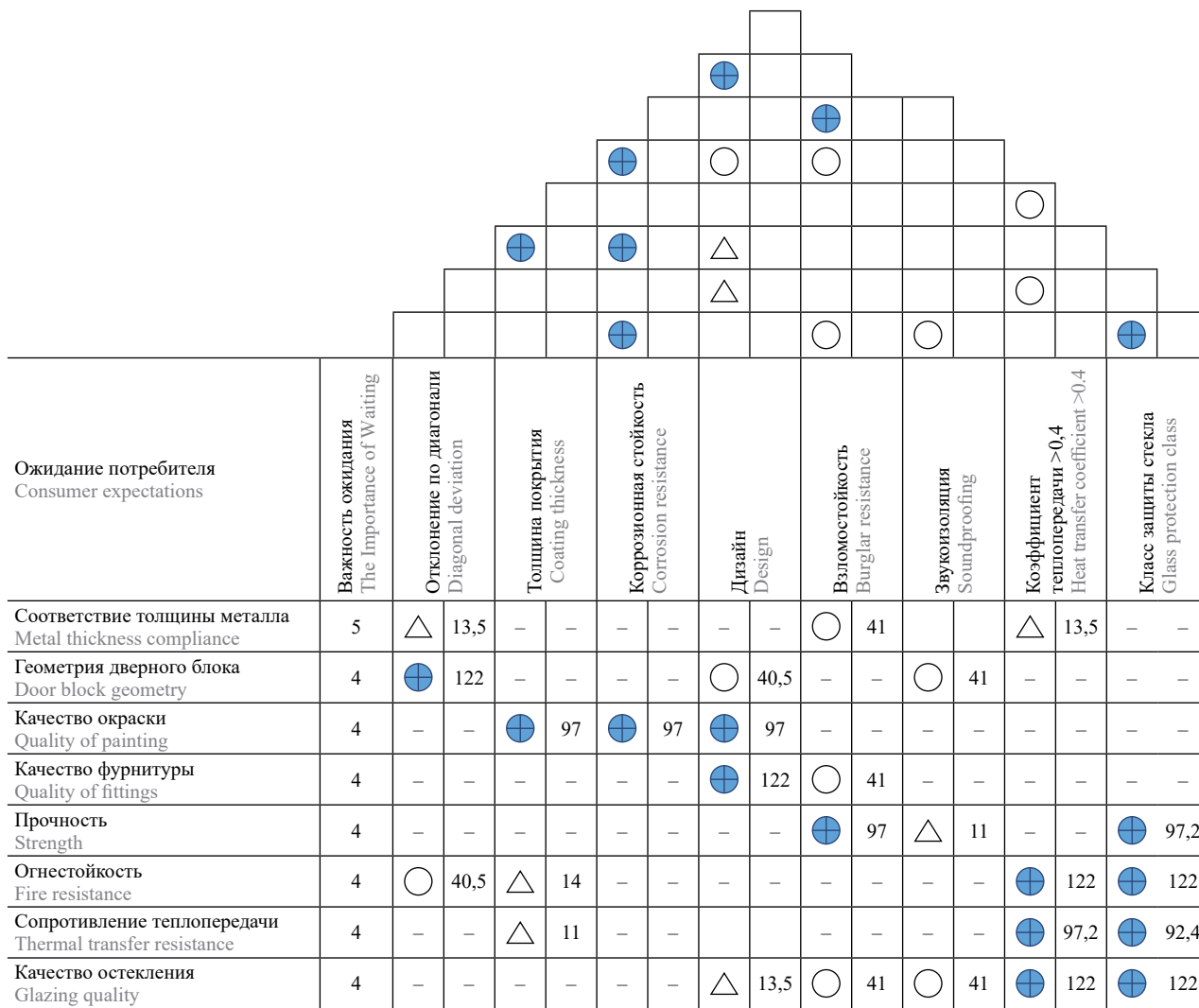
$\text{П}^{\text{макс}}$ — максимальная оценка последствий, которые могут произойти при возникновении нежелательного события;

Ч_i — оценка вероятности возникновения зависящего нежелательного события;

O_i — оценка возможности обнаружения зависящего нежелательного события, либо его последствия или причины.

Итоговый расчет приоритетного числа риска сводится к суммированию всех ранее рассчитанных значений. Интеграции QFD и FMEA осуществляются за счет формирования матрицы оценки рисков по указанным в Доме качества характеристикам (табл. 1).

¹ ГОСТ Р ИСО 9001–2015. Национальный стандарт Российской Федерации системы менеджмента качества (дата введения: 2015-11-01).



Суммарная оценка Overall score	175,5	121,3	97	272,5	178,2	91,8	340,2	432,6
Приоритетность, % Priority, %	10,3	7,1	5,7	15,9	10,4	5,4	19,9	25,3
Единицы измерения Units of measurement	мм mm	мкм microns	мкм/год m/year	балл score	класс type	дБ dB	Вт/м²·К W/m²·K	класс type
Наша продукция Our products	2	130	20	8	2	32	0,4	СМ4
Продукция конкурентов Competitors' products	3	100	30	7	2	29	0,4	СМ3
Целевое значение Target value	3	100	20	10	3	32	0,4	СМ4
ПЧРн RPNd	70	120	45	94	106	80	82	125
ПЧР* RPN*	35	54	20	56	48	40	64	50

Оценка Grade	Целевое значение Target value		Степень улучшения Degree of improvement		Весомость Weightiness	
	4	5	1	1,25	5	13,5
4	-	5	-	-	-	-
-	-	5	1	5	13,5	13,5
-	5	1,25	5	13,5	13,5	13,5
5	4	1	4	10,8	10,8	10,8
5	5	1,25	5	13,5	13,5	13,5
4	4	1	4	10,8	10,8	10,8
5	5	1,25	5	13,5	13,5	13,5
4	4	1	4	10,8	10,8	10,8
5	5	1,25	5	13,5	13,5	13,5
37	100					

⊕ 9; ○ 3; △ 1; ■ ■ Конкуренты / Competitors

Рис. 1. Фрагмент результатов QFD стальных, дымогазонепроницаемых дверей
Fig. 1. Fragment of QFD results for steel, smoke- and gas-tight doors

Таблица 1. Интеграция результатов QFD и FMEA
Table 1. Integration of QFD and FMEA results

Суммарная оценка Overall score	175,5	121,3	97	272,5	178,2	91,8	340,2	432,6
Приоритетность, % Priority, %	10,3	7,1	5,7	15,9	10,4	5,4	19,9	25,3
Единицы измерения Units of measurement	мм mm	мкм microns	мкм/год µm/year	балл score	класс type	дБ dB	Вт/м²·К W/m²·K	класс type
Наша продукция Our products	2	130	20	8	2	32	0,4	СМ4
Продукция конкурентов Competitors' products	3	100	30	7	2	29	0,4	СМ3
Целевое значение Target value	3	100	20	10	3	32	0,4	СМ4
ПЧРн RPNd	70	120	45	94	106	80	82	125
ПЧР* RPN*	35	54	20	56	48	40	64	50

Такой подход позволит грамотно наследовать результаты QFD при проведении FMEA, иначе результаты двух методов не будут работать эффективно [16]. Это не означает, что при FMEA следует учитывать только те характеристики, которые имеются в Доме качества, но таким образом формируется минимальный перечень характеристик, обязательных к рассмотрению и анализу, так как они напрямую влияют на конкурентоустойчивость продукции [19].

Таким образом, общий подход к оценке системы применяемых методов менеджмента качества (рис. 2) основан на оценках актуальности методов, их доступности конкретному работнику (в том числе за счет

активной стандартизации) [20], интеграции в существующие подходы и культуру производства и адаптации под конкретные задачи.

В итоге вся система мониторинга качества продукции и процессов должна отвечать требованиям валидности. В данной статье установим следующие определения оценки валидности системы мониторинга качества:

- *внешняя валидность* — отвечает на вопрос обобщения результатов оценки для других продуктов и процессов;
- *операционная валидность* — частный случай внешней валидности, отвечает на вопрос,

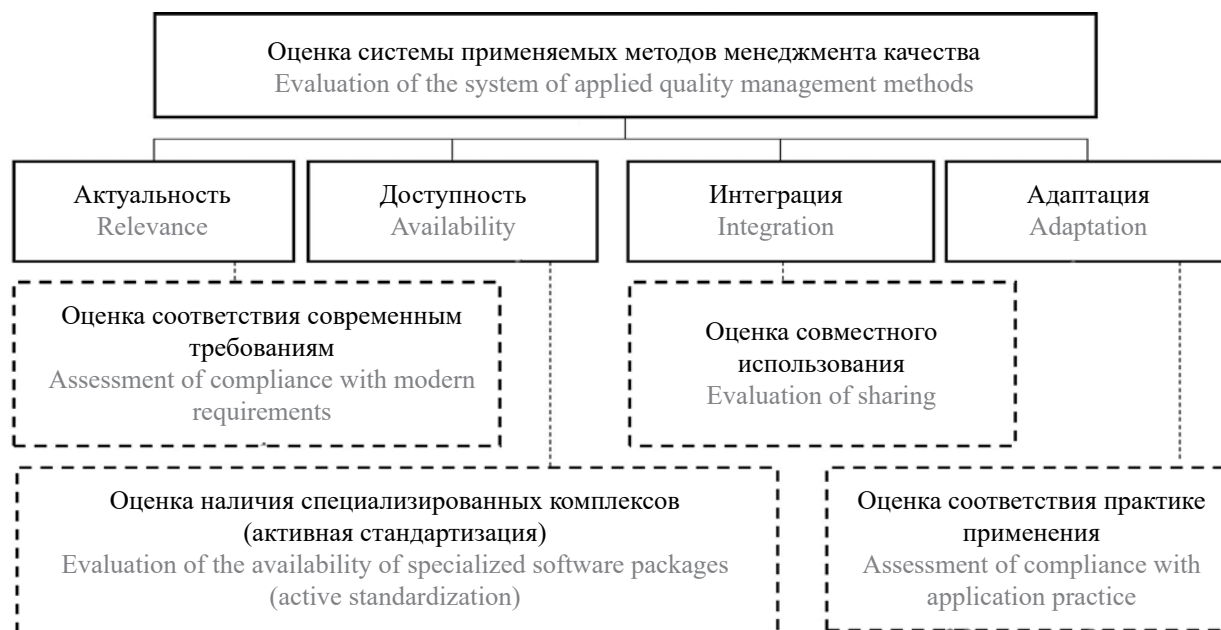


Рис. 2. Основные направления оценки системы применяемых методов менеджмента качества
Fig. 2. Main directions for evaluating the system of applied quality management methods

Таблица 2. Оценка валидности методов управления качеством (семь новых методов)
Table 2. Evaluation of the quality management methods validity (seven new methods)

Методы менеджмента качества Quality management methods	Предложенные типы валидности Proposed types of validity				
	Внешняя External	Операционная Operational	Конструктивная Constructive	Методическая Methodological	Инкрементная Incremental
Диаграмма сродства Affinity diagram	Средняя Average	Высокая High	Высокая High	Высокая High	Средняя Average
Диаграмма связей Interrelationship diagram	Низкая Low	Средняя Average	Высокая High	Высокая High	Высокая High
Дерево решений Tree diagram	Средняя Average	Средняя Average	Высокая High	Высокая High	Высокая High
Матричная диаграмма Matrix diagram	Низкая Low	Низкая Low	Средняя Average	Высокая High	Средняя Average
Стрелочная диаграмма Arrow diagram	Средняя Average	Высокая High	Средняя Average	Высокая High	Высокая High
PDPC	Низкая Low	Высокая High	Высокая High	Высокая High	Высокая High
Матрица приоритетов Prioritization matrix	Высокая High	Высокая High	Средняя Average	Высокая High	Средняя Average

насколько результаты оценки первой партии продукции можно распространять на последующие (примером может быть выборочный контроль, т.е. насколько метод менеджмента качества позволяет отойти от стопроцентного контроля);

- *конструктивная валидность* — отвечает на вопрос, в достаточной ли степени результаты применения метода менеджмента качества соответствуют реальной изменчивости показателей качества;
- *методическая валидность* — отвечает на вопрос, действительно ли оценивается тот параметр, который необходим;
- *инкрементная валидность* — отвечает на вопрос правильности классификации продукции по уровню качества.

Оценка валидности методов менеджмента качества будет носить экспертно-статистический характер, для упрощения результаты оценки сведем в табл. 2. В итоге получим комплексной анализ методов менеджмента качества, что позволит понимать их преимущества и недостатки.

Заключение

Группа методов мониторинга качества продукции, особенно относящейся к управлению безопасностью продукции, должна обладать всеми признаками системы, т.е. быть целостной, отвечать поставленным целям и задачам, быть результативной и эффектив-

ной, эмерджентной, актуальной и адаптивной. Иначе применение методов отдельно друг от друга приводит к конфликтам не только ресурсов и времени, но и управленческих решений. Без интеграции методов между собой, например, QFD и FMEA характеристики продукции рассматриваются без учета предыдущих этапов, предыдущих результатов оценки важности характеристик, рисков, связанных с ними как при производстве, так и при эксплуатации.

Построение системы мониторинга должно начинаться с оценки предлагаемых методов менеджмента качества, их валидности и возможностей. Следует отметить, что интеграция методов менеджмента качества может происходить как за счет наследия результатов применения методов, так и за счет изменения логики, а следовательно, подходов и формул расчетов показателей качества.

Дальнейшее развитие методов менеджмента качества будет происходить за счет их совместного применения на конкретных этапах жизненного цикла. Методы менеджмента качества отвечают такому запросу, так как обладают очень высокой степенью адаптации к конкретным условиям и требованиям. Фактически грамотность применения метода зависит от персонала, который его использует, важным моментом является то, что следует отказаться от практики применения метода менеджмента качества ради самого метода и ответить на вопрос, какую задачу он решает.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Frolova E., Gazizulina A., Eskina E., Ostarenko M., Aidarov D. Development of QFD Methodology // Springer Proceedings in Business and Economics. 2018. Pp. 121–128. DOI: 10.1007/978-981-10-5577-5_10. EDN FVRQOS.
2. Fazeli H.R., Peng Q. Integrated approaches of BWM-QFD and FUCOM-QFD for improving weighting solution of design matrix // Journal of Intelligent Manufacturing. 2023. No. 34 (3). Pp. 1003–1020. DOI: 10.1007/s10845-021-01832-w. EDN NBIMGE.
3. Tian Z.P., Nie R.X., Wang J.Q., Li L. Group multigranular linguistic QFD for prioritizing service designs with combined weighting method // Expert Systems. 2019. No. 36 (4). P. e12419. DOI: 10.1111/exsy.12419. EDN ONXTFO.
4. Hartanti L.P.S., Mulyono Ju., Mayang V. Penerapan FMEA dan fuzzy FMEA dalam penilaian Risiko lean waste di industri manufaktur // JST (Jurnal Sains dan Teknologi). 2022. No. 11 (2). Pp. 293–304. DOI: 10.23887/jstundiksha.v11i2.50552. EDN BAXEXJ.
5. Ivančan J., Lisjac D. New FMEA Risks Ranking Approach Utilizing Four Fuzzy Logic Systems // Machines. 2021. No. 9 (11). P. 292. DOI: 10.3390/machines9110292. EDN WZTXBN.
6. Klochkov Yu., Samorukov D., Samorukov V. Quality management models and methods improvement for an expanding competitive range of leather and footwear products // Proceedings on Engineering Sciences. 2024. No. 6 (2). Pp. 629–636. DOI: 10.24874/pes06.02.019. EDN GNSWRI.
7. Liu Q., Chen X., Tang X. Spherical fuzzy bipartite graph based QFD methodology (SFBG-QFD): Assistive products design application // Expert Systems with Applications. 2024. No. 239. P. 122279. DOI: 10.1016/j.eswa.2023.122279
8. García Aguirre P.A., Pérez-Domínguez L., Luviano-Cruz D. PFDA-FMEA, an Integrated Method Improving FMEA Assessment in Product Design // Applied Sciences (Switzerland). 2021. No. 11 (4). P. 1406. DOI: 10.3390/app11041406. EDN BTJMSK.
9. Frizziero L., Donnici G., Galiè G., Pala G., Pilla M., Zamagna E. QFD and SDE Methods Applied to Autonomous Minibus Redesign and an Innovative Mobile Charging System (MBS) // Inventions. 2023. No. 8 (1). P. 1. DOI: 10.3390/inventions8010001. EDN LSPSFG.
10. Sivasankaran P. Literature Review on Quality Concepts in Industrial Systems using QFD (Quality Function Deployment) — Survey and Extensions // Productivity. 2021. No. 61 (4). Pp. 463–469. DOI: 10.32381/prod.2021.61.04.9. EDN EPWLGW.
11. Zhou X., Chen Ch., Tian H., Wang L., Yang Zh., Yang H. Time-varying FMEA method based on interval-valued spherical fuzzy theory // Quality and Reliability Engineering International. 2021. No. 37 (8). Pp. 3713–3729. DOI: 10.1002/qre.2943. EDN RYAVZQ.
12. Wang W.A., Ma Y., Liu Sh. Z-number integrated weighted MULTIMOORA method for risk prioritization in FMEA // Journal of Intelligent and Fuzzy Systems. 2021. No. 41 (2). Pp. 2523–2537. DOI: 10.3233/jifs-200678. EDN ITUQBS.
13. Абдусаломов А.Г.У. Применения FMEA-анализа на металлургических предприятиях // Качество и жизнь. 2025. № 1 (45). С. 54–60. EDN DLMREW.
14. Даниелян А.С., Хунузиди Е.И. Метод QFD: от Индустрии 3.0 к Индустрии 4.0. Часть 2 // Контроль качества продукции. 2025. № 4. С. 62–64. EDN KHMJEJ.
15. Касторская Л.В., Розно М.И., Чуклина Е.В. Метод FMEA: предупреждения, которые нужно «услышать» // Методы менеджмента качества. 2025. № 7. С. 40–41. EDN PRHPNO.
16. Клочков Ю.С., Коваль Н.О. Развитие метода развертывания функций качества на этапе проектирования продукции // Известия Самарского научного центра Российской академии наук. 2024. № 26 (4–3). Т. 120. С. 428–436. DOI: 10.37313/1990-5378-2024-26-4(3)-428-436. EDN OJMXWB.
17. Козьминых М.Ю., Клочков Ю.С. Модель управления рисками развития опасных техногенных процессов в деятельности высокотехнологичных производств на основе результатов контрольной надзорной деятельности // Известия Самарского научного центра Российской академии наук. 2024. № 26. Т. 1 (117). С. 33–45. DOI: 10.37313/1990-5378-2024-26-1-33-45. EDN JGISSY.
18. Плотинский Ю.М. Проблемы развития общества знаний: социокогнитивный подход // Информационное общество. 2008. № 5–6. С. 43–50. EDN KVMXNF.
19. Холбоева У.Ш., Остапенко М.С. Система автоматизации построения «дома качества» при проведении QFD анализа : мат. Междунар. науч.-практ. конф. им. Д.И. Менделеева, посвящ. 15-летию Института промышленных технологий и инжиниринга. Тюмень : ТИУ, 2024. С. 282–284. EDN NEPDMV.
20. Остапенко М.С., Холбоева У.Ш., Тверяков А.М. Разработка онлайн-приложения для автоматизации построения «дома качества» при проведении QFD-анализа // Архитектура, строительство, транспорт. 2024. № 4 (110). С. 114–124. DOI: 10.31660/2782-232X-2024-4-114-123. EDN TAWVJQ.

REFERENCES

1. Frolova E., Gazizulina A., Eskina E., Ostarenko M., Aidarov D. Development of QFD Methodology. *Springer Proceedings in Business and Economics*. 2018; 121-128. DOI: 10.1007/978-981-10-5577-5_10. EDN FVRQOS.
2. Fazeli H.R., Peng Q. Integrated approaches of BWM-QFD and FUCOM-QFD for improving weighting solution of design matrix. *Journal of Intelligent Manufacturing*. 2023; 34(3):1003-1020. DOI: 10.1007/s10845-021-01832-w. EDN NBIMGE.
3. Tian Z.P., Nie R.X., Wang J.Q., Li L. Group multigranular linguistic QFD for prioritizing service designs with combined weighting method. *Expert Systems*. 2019; 36(4):e12419. DOI: 10.1111/exsy.12419. EDN ONXTFO.
4. Hartanti L.P.S., Mulyono Ju., Mayang V. Penerapan FMEA dan fuzzy FMEA dalam penilaian Risiko lean waste di industri manufaktur. *JST (Jurnal Sains dan Teknologi)*. 2022; 11(2):293-304. DOI: 10.23887/jstundiksha.v11i2.50552. EDN BAXEXJ.
5. Ivančan J., Lisjac D. New FMEA Risks Ranking Approach Utilizing Four Fuzzy Logic Systems. *Machines*. 2021; 9(11):292. DOI: 10.3390/machines9110292. EDN WZTXBN.
6. Klochkov Yu., Samorukov D., Samorukov V. Quality management models and methods improvement for an expanding competitive range of leather and footwear products. *Proceedings on Engineering Sciences*. 2024; 6(2):629-636. DOI: 10.24874/pes06.02.019. EDN GNSWRI.
7. Liu Q., Chen X., Tang X. Spherical fuzzy bipartite graph based QFD methodology (SFBG-QFD): Assistive products design application. *Expert Systems with Applications*. 2024; 239:122279. DOI: 10.1016/j.eswa.2023.122279
8. García Aguirre P.A., Pérez-Domínguez L., Luviano-Cruz D. PFDA-FMEA, an Integrated Method Improving FMEA Assessment in Product Design. *Applied Sciences (Switzerland)*. 2021; 11(4):1406. DOI: 10.3390/app11041406. EDN BTJMSK.
9. Frizziero L., Donnici G., Galiè G., Pala G., Pilla M., Zamagna E. QFD and SDE Methods Applied to Autonomous Minibus Redesign and an Innovative Mobile Charging System (MBS). *Inventions*. 2023; 8(1):1. DOI: 10.3390/inventions8010001. EDN LSPSFG.
10. Sivasankaran P. Literature Review on Quality Concepts in Industrial Systems using QFD (Quality Function Deployment) — Survey and Extensions. *Productivity*. 2021; 61(4):463-469. DOI: 10.32381/prod.2021.61.04.9. EDN EPWLGW.
11. Zhou X., Chen Ch., Tian H., Wang L., Yang Zh., Yang H. Time-varying FMEA method based on interval-valued spherical fuzzy theory. *Quality and Reliability Engineering International*. 2021; 37(8):3713-3729. DOI: 10.1002/qre.2943. EDN RYAVZQ.
12. Wang W.A., Ma Y., Liu Sh. Z-number integrated weighted MULTIMOORA method for risk prioritization in FMEA. *Journal of Intelligent and Fuzzy Systems*. 2021; 41(2):2523-2537. DOI: 10.3233/jifs-200678. EDN ITUQBS.
13. Abdusalomov A.G.U. Applications of PME analysis in metallurgical plants. *Quality and life*. 2025; 1(45):54-60. EDN DLMREW. (rus).
14. Danielyan A.S., Khunuzidi E.I. QFD Metod: from Industry 3.0 to Industrii 4.0. Part 2. *Production quality control*. 2025; 4:62-64. EDN KHMJEJ. (rus).
15. Kastorskaya L.V., Rozno M.I., Chuklina E.V. FMEA Method: Warnings to Heed. *Methods of Quality Management*. 2025; 7:40-41. EDN PRHPNO. (rus).
16. Klochkov Yu.S., Koval N.O. Development of the quality function deployment method at the product design stage. *Izvestia of Samara Scientific Center of the Russian Academy of Science*. 2024; 26(4-3):(120):428-436. DOI: 10.37313/1990-5378-2024-26-4(3)-428-436. EDN OJMXWB. (rus).
17. Kozminykh M.Yu., Klochkov Yu.S. Risk management model for the development of hazardous man-made processes in the activities of high-tech industries based on the results of control supervisory activities. *Izvestia of Samara Scientific Center of the Russian Academy of Science*. 2024; 26:1(117):33-45. DOI: 10.37313/1990-5378-2024-26-1-33-45. EDN JGISSY. (rus).
18. Plotinskiy Yu.M. Problems of Development of the Knowledge Society: A Sociocognitive Approach. *Information society*. 2008; 5-6:43-50. EDN KVMXNF. (rus).
19. Kholboeva U.Sh., Ostapenko M.S. Automation system for constructing a “house of quality” during QFD analysis : *Proceedings of the International Scientific and Practical Conference named after D.I. Mendeleev, dedicated to the 15th anniversary of the Institute of Industrial Technology and Engineering*. Tyumen, TIU, 2024; 282-284. EDN NEPDMV.
20. Ostapenko M.S., Kholboeva U.Sh., Tveryakov A.M. Developing an online application for automating “house of quality” construction for QFD analysis. *Architecture, construction, transport*. 2024; 4(110):114-124. DOI: 10.31660/2782-232X-2024-4-114-123. EDN TAWVJQ. (rus).

Поступила 02.10.2025, после доработки 01.11.2025;

принята к публикации 01.12.2025

Received October 02, 2025; Received in revised form November 01, 2025;

Accepted December 01, 2025

Информация об авторах

КЛОЧКОВ Юрий Сергеевич, д.т.н., доцент, и.о. ректора, Тюменский индустриальный университет (ТИУ), Россия, 625000, г. Тюмень, ул. Володарского, 38; ORCID: 0000-0002-7913-8285; ResearcherID: H-6364-2016; Scopus AuthorID: 57202887977; e-mail: y.kloch@mail.ru

ТВЕРЯКОВ Андрей Михайлович, к.т.н., доцент, директор нефтегазового института, Тюменский индустриальный университет (ТИУ), Россия, 625000, г. Тюмень, ул. Володарского, 38; ORCID: 0000-0002-6444-2559; ResearcherID: N-9479-2016; Scopus AuthorID: 56251825200; e-mail: tveryakov@mail.ru

КОВАЛЬ Никита Олегович, генеральный директор ЗАО «Металлтехкомплект», соискатель, Тюменский индустриальный университет (ТИУ), Россия, 625000, г. Тюмень, ул. Володарского, 38; ORCID: 0009-0009-5148-7924; e-mail: 79312662323@ya.ru

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

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Information about the authors

Yury S. KLOCHKOV, Dr. Sci. (Eng.), Professor, Rector, Industrial University of Tyumen (TIU), Volodarsky St., 38, Tyumen, 625000, Russian Federation; ORCID: 0000-0002-7913-8285; ResearcherID: H-6364-2016; Scopus AuthorID: 57202887977; e-mail: y.kloch@mail.ru

Andrey M. TVERYAKOV, Cand. Sci. (Eng.), Associate Professor, Director of Oil and Gas Institute, Industrial University of Tyumen (TIU), Volodarsky St., 38, Tyumen, 625000, Russian Federation; ORCID: 0000-0002-6444-2559; ResearcherID: N-9479-2016; Scopus AuthorID: 56251825200; e-mail: tveryakov@mail.ru

Nikita O. KOVAL, Director of Metalltekhkomplekt CJSC, degree applicant, Industrial University of Tyumen (TIU), Volodarsky St., 38, Tyumen, 625000, Russian Federation; ORCID: 0009-0009-5148-7924; e-mail: 79312662323@ya.ru

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

The authors declare no conflicts of interests.

Совершенствование обоснования выбора технических решений системы пожарной безопасности объекта защиты на основе учета удельной массовой скорости выгорания для веществ и материалов

Анна Владимировна Александрова¹ ✉, Роман Евгеньевич Попко^{1,2}

¹ Кубанский государственный технологический университет (КубГТУ), г. Краснодар, Россия

² ООО «Спектр ПБ», г. Краснодар, Россия

АННОТАЦИЯ

Введение. В целях модернизации законодательства в области пожарной безопасности актуальными представляются задачи выявления существующих требований, которые несут элементы неактуального и/или избыточного характера, для последующей их корректировки. Наиболее важными направлениями нормотворческой деятельности в области пожарной профилактики пожаров являются разработка, модификация, гармонизация и актуализация обязательных и «добровольных» требований на основе выполненных исследований нормативной базы, регламентирующей противопожарные требования к промышленным объектам, а также научно обоснованному выбору области их применения.

Цели и задачи. Цель настоящего исследования — совершенствование выбора наиболее эффективных и рациональных технических решений при построении системы пожарной безопасности объекта защиты на основе более широкого использования характеристик используемых на нем материалов и веществ по показателю удельной массовой скорости выгорания. Задачи исследования включали обоснование необходимости уточнения исходных характеристик применяемых материалов и веществ на объекте защиты, влияющих на выбор элементов системы пожарной безопасности; обоснование целесообразности применения показателя — удельной массовой скорости выгорания для рациональных технических решений в системе пожарной безопасности; предложение последовательности разработки системы пожарной безопасности на базе расширенного учета предложенного критерия.

Основная часть. На практических примерах обоснована необходимость уточнения исходных характеристик применяемых материалов и веществ на объекте защиты, влияющих на выбор элементов системы пожарной безопасности. Показана целесообразность применения показателя — удельной массовой скорости выгорания для рациональных технических решений в системе пожарной безопасности. Предложена последовательность разработки системы пожарной безопасности на базе расширенного учета предложенного показателя.

Выводы. Таким образом, показаны предпосылки для совершенствования существующей обязательной системы пожарно-технической классификации для установления объективных требований пожарной безопасности, учитывающей все особенности защищаемого объекта. Предложены инструменты, позволяющие использование критерия удельной массовой скорости выгорания. Описан примерный алгоритм принятия решения по выбору наиболее оптимальных элементов системы пожарной безопасности в зависимости от удельной массовой скорости выгорания.

Ключевые слова: обязательные требования пожарной безопасности; распространение пожара; пожарно-техническая классификация; взрыв; ущерб от пожара

Для цитирования: Александрова А.В., Попко Р.Е. Совершенствование обоснования выбора технических решений системы пожарной безопасности объекта защиты на основе учета удельной массовой скорости выгорания для веществ и материалов // Пожаровзрывобезопасность/Fire and Explosion Safety. 2025. Т. 34. № 6. С. 58–66. DOI: 10.22227/0869-7493.2025.34.06.58-66

✉ Александрова Анна Владимировна, e-mail: alexanna@mail.ru

Improving the justification of the choice of technical solutions for the fire safety system of the protected object based on the specific mass fraction of burning for substances and materials

Anna V. Aleksandrova¹ ✉, Roman E. Popko^{1,2}

¹ Kuban State Technological University (KubSTU), Krasnodar, Russian Federation

² Spectrum PB LLC, Krasnodar, Russian Federation

ABSTRACT

Introduction. In order to modernize the legislation in the field of fire safety, it is important to identify existing requirements that are outdated and/or redundant, in order to correct them. It is also important to expand the application of the existing mandatory classification system for various protected objects and substances and materials that can be a fire hazard. The most important areas of normative activity in the field of fire prevention are the development, modification, harmonization, and updating of mandatory and “voluntary” requirements based on the research of the regulatory framework governing fire protection requirements for industrial facilities, as well as the scientifically based selection of their application areas.

Goals and objectives. The purpose of this study is to improve the selection of the most effective and rational technical solutions for building a fire safety system for a protected object based on a broader use of the characteristics of the materials and substances used on the object, as measured by the specific mass rate of combustion. The objectives of the study include: justifying the need to clarify the initial characteristics of the materials and substances used on the protected object that affect the selection of elements in the fire safety system; justifying the use of the specific mass rate of combustion as a criterion for selecting rational technical solutions in the fire safety system; and proposing a sequence for developing a fire safety system based on the expanded consideration of the proposed criterion.

Analytical part. The practical examples substantiate the need for a more extensive use of the physical and chemical properties of combustible substances and materials that affect the choice of fire safety system elements. The expediency of using the specific mass rate of combustion for rational technical solutions in the fire safety system is shown. The sequence of developing a fire safety system based on the extended consideration of the proposed indicator is proposed.

Conclusions. Thus, the prerequisites for improving the existing mandatory fire-technical classification system are shown to establish objective fire safety requirements that take into account all the features of the protected object. The tools allowing the use of the criterion of the specific mass burnout rate are proposed. An approximate decision-making algorithm is described for choosing the most optimal elements of a fire safety system depending on the specific mass burnout rate.

Keywords: mandatory fire safety requirements; fire spread; fire technical classification; explosion; fire damage

For citation: Aleksandrova A.V., Popko R.E. Improving the justification of the choice of technical solutions for the fire safety system of the protected object based on the specific mass fraction of burning for substances and materials. *Pozharovzryvobezopasnost/Fire and Explosion Safety*. 2025; 34(6):58-66. DOI: 10.22227/0869-7493.2025.34.06.58-66 (rus).

✉ Anna Vladimirovna Aleksandrova, e-mail: alexanna@mail.ru

Введение

Важную роль в модернизации системы обязательных требований, в том числе в области обеспечения пожарной и промышленной безопасности, выполнило вступление в силу Федерального закона «Об обязательных требованиях в Российской Федерации» от 31.07.2020 № 247-ФЗ, закрепившего, в частности, принципы установления и оценки применения обязательных требований (среди которых: обоснованность, правовая определенность и исполнимость обязательных требований)¹. Высшим руководством нашей страны анонсирован новый виток

модернизированной «регуляторной гильотины», которая называется властями инструментом пересмотра и отмены нормативных правовых актов, негативно влияющих на общий бизнес-климат и регуляторную среду².

Надо также упомянуть, что содержание ст. 22 Закона о госконтроле предусматривает необходимость осуществления госконтроля (надзора), муниципального контроля на основе управления рисками причинения вреда (ущерба), определяющего выбор профилактических мероприятий и контрольных (надзорных)

¹ Об обязательных требованиях в Российской Федерации : Федеральный закон от 31.07.2020 № 247-ФЗ. URL: <http://publication.pravo.gov.ru/Document/View/0001202007310002>

² Официальный сайт Министерства экономического развития Российской Федерации. Механизм «регуляторной гильотины». URL: https://economy.gov.ru/material/directions/gosudarstvennoe_upravlenie/mehanizm_regulyatornoy_gilotiny/

мероприятий, их содержание (в том числе объем проверяемых обязательных требований), интенсивность и результаты³.

Наиболее важными направлениями нормотворческой деятельности в области пожарной профилактики пожаров являются разработка, модификация, гармонизация и актуализация обязательных и «добровольных» требований на основе выполненных исследований нормативной базы, регламентирующей противопожарные требования к промышленным объектам [1–3], а также научно обоснованному выбору области их применения [4, 5]. Часть исследований направлена на формирование научной основы для совершенствования пожарно-технической экспертизы, рассматриваются некоторые неопределенности и стереотипы, связанные с горючестью горючего вещества или материала [6, 7].

В целях модернизации законодательства в области пожарной безопасности актуальными представляются задачи выявления существующих требований, которые несут элементы неактуального и/или избыточного характера, для последующей их корректировки.

Существующая система пожарно-технической классификации, представленная в Федеральном законе⁴, является устойчивой частью ранее существовавшей (консервативной) системы государственных требований к обеспечению пожарной безопасности объекта, основанной на безальтернативности установленных государством требований.

Сутью консервативной системы является применение закрытого и сравнительно небольшого по количеству перечня технических решений в качестве обязательных требований. При таком подходе пожарная и промышленная безопасность считаются обеспеченными, если исполнен весь перечень технических решений, установленный нормативным актом, содержащим обязательные требования.

При устоявшейся системе обеспечения пожарной безопасности такая часть нормативных требований как пожарно-техническая классификация не могла гибко развиваться, так как еще большая детализация квалифицируемой характеристики или появление новых видов квалификации были бы неспособны значительно повлиять на принятие окончательных технических решений.

Цель настоящего исследования — совершенствование выбора наиболее эффективных и рациональных технических решений при построении системы

пожарной безопасности объекта защиты на основе более широкого использования характеристик, используемых на нем материалов и веществ по показателю удельной массовой скорости выгорания.

Задачи исследования:

- обосновать необходимость уточнения исходных характеристик применяемых материалов и веществ на объекте защиты, влияющих на выбор элементов системы пожарной безопасности;
- обосновать целесообразность применения показателя — удельной массовой скорости выгорания для выработки рациональных технических решений в системе пожарной безопасности;
- предложить последовательность разработки системы пожарной безопасности на базе расширенного учета предложенного критерия (на примерах).

Основная (аналитическая часть)

В ходе настоящего исследования для решения задачи анализа и выявления обязательных требований, нуждающихся в актуализации, был выявлен ряд таковых примеров. В качестве одного из примеров можно рассмотреть СП 486.1311500.2020⁵. В данном документе по-прежнему осталось требование об оснащении производственных и складских помещений категории А площадью более 300 м² системами автоматического пожаротушения, что само по себе является неоднозначным с учетом многообразия оснащения современного складского хозяйства и экономической целесообразности с позиции возможного прогнозируемого ущерба. Очевидно, что для помещений категории А увеличение затрат на предотвращение взрыва за счет снижения затрат на пожаротушение будет более целесообразнее, чем для низких категорий пожарной опасности.

Другим характерным примером может являться требование о расстоянии между секциями наружных установок не менее 15 м, изложенное в СП 4.13130.2013⁶, однако этим же сводом правил определено, что ширина наружной установки (или ее секции) зависит от наличия оборудования высотой до 18 м. При этом можно считать вполне вероятным, что упавшее при пожаре оборудование высотой 18 м на соседнюю секцию, размещенную на расстоянии

³ О государственном контроле (надзоре) и муниципальном контроле в Российской Федерации : Федеральный закон от 31.07.2020 № 248-ФЗ. URL: <https://pravo.gov.ru/proxy/ips/?docbody=&nd=102801479>

⁴ Технический регламент о требованиях пожарной безопасности : Федеральный закон от 22.07.2008 г. № 123-ФЗ.

⁵ СП 486.1311500.2020. Системы противопожарной защиты. Перечень зданий, сооружений, помещений и оборудования, подлежащих защите автоматическими установками пожаротушения и системами пожарной сигнализации. Нормы и правила проектирования. URL: <https://mchs.gov.ru/dokumenty/vse-dokumenty/6696>

⁶ СП 4.13130.2013. Системы противопожарной защиты. Ограничение распространения пожара на объектах защиты. Требования к объемно-планировочным и конструктивным решениям. URL: vody-pravil-mchs-rossii/6667

15 м, станет причиной дальнейшей эскалации аварии (пожара).

Оба приведенных примера показывают, что типов обязательной пожарно-технической классификации, изложенных в Федеральном законе⁴, недостаточно для установления обоснованных требований пожарной безопасности, особенно для опасных производственных объектов, подпадающих под регулирование Федерального закона⁷.

В качестве разработки предложений по совершенствованию обязательных требований пожарной безопасности авторы рассматривают целесообразность более широкого учета показателя «удельная массовая скорость выгорания, килограмм в секунду на квадратный метр» для оценки пожарной опасности веществ и материалов в зависимости от их агрегатного состояния (табл. 1 Федерального закона⁴). Данный показатель устанавливается только для жидких веществ и твердых материалов и не устанавливается для газообразных веществ и пылей.

Подробнее рассмотрим потенциальное влияние данного показателя на систему обеспечения пожарной безопасности. При этом отметим, что данный показатель никоим образом не должен снижать эффективность работы системы пожарной безопасности в части решения задач по недопустимости причинения вреда жизни и здоровью людей и сохранности имущества третьих лиц. Влияние допустимо только для той части системы пожарной безопасности, которая нацелена на сохранность имущества собственника.

Физическая связь показателя «удельная массовая скорость выгорания» с системой пожарной безопасности является вполне очевидной, это скорость реагирования системы пожарной безопасности на развивающийся фактор причинения вреда имуществу собственника. Рассмотрим в качестве обоснования примеры «А» и «Б».

Согласно первому примеру («А») на территории промышленного предприятия, имеющего объектовую пожарную охрану, размещено складское здание категории В — пожароопасность. Самое большое, диктующее помещение имеет категорию В2, пожарную нагрузку составляют трудногорючие и горючие твердые материалы и вещества. Помещение является отдельным пожарным отсеком площадью 25 000 м². В складском помещении организовано хранение на стеллажах высотой более 5,5 м, что требует оснащения здания автоматической установкой пожаротушения. Время прибытия первого пожар-

ного автомобиля и подачи первой компактной струи не превышает 5 мин.

Известно, что современные программные средства позволяют проводить весьма точное моделирование аварий, в том числе взрывов и пожаров [6–8]. Среди программных средств существуют как успешные отечественные, так и зарубежные (например, TOXI+Risk, Fenix+, ПК «Русь», FireGuard, FLACS и т.п.) [9–11]. Данные результатов такого моделирования являются важным обоснованием при выборе и оценке эффективности мер пожарной безопасности [12–14]. Моделирование и имитационные методы были приняты в экспертном сообществе для проведения исследований из-за многофакторности и сложности получения базы данных реальных случаев пожаров и взрывов, связанных с этим явлением [15].

Математическое моделирование наиболее вероятного пожара в рамках настоящего исследования показало, что в течение 10 мин (это является двукратным относительно времени прибытия пожарных подразделений) пожар не распространится за пределы одного стеллажа хранения и величина прогнозируемого ущерба не будет превышать 1,5 млн рублей. Очевидно, что многомиллионные затраты на автоматическую установку пожаротушения (проектирование, монтаж, обслуживание) с финансовой точки зрения не целесообразны для предотвращения ущерба размером менее 1,5 млн рублей. В этом случае эффективной мерой можно считать установку системы раннего обнаружения пожара (например, аспирационной) с автоматической передачей сигнала в пожарную охрану предприятия. При сопоставимой эффективности способов тушения применение существующей пожарной охраны предприятия экономически целесообразнее.

Согласно второму примеру («Б»), в административно-бытовом здании размещено помещение с оборудованием автоматической системы управления сложными технологическими процессами, нарушение работы которых может повлиять на безопасность людей. Оборудование размещено в нескольких металлических несгораемых запираемых шкафах. В соответствии с действующими требованиями помещение должно оборудоваться автоматической установкой пожаротушения. Математическое моделирование пожара в шкафу с самой большой пожарной нагрузкой показало, что температура воздуха в помещении при максимальной температуре пожара в шкафу не достигнет предела требуемого для срабатывания теплового извещателя. Требуемая плотность дыма для срабатывания дымового пожарного извещателя наступит через 8–9 мин от начала возгорания. Отметим, что 8–9 мин — это недопустимое время для реагирования системы пожарной безопасности, и даже при обеспечении безопасности жизни и здоровья

⁷ О промышленной безопасности опасных производственных объектов : Федеральный закон от 21.07.1997 г. № 116-ФЗ. URL: <http://pravo.gov.ru/proxy/ips/?docbody=&prevDoc=102057586&backlink=1&nd=102048376&rdk=0>

людей экономический ущерб, вызванный изменениями технологического процесса (остановка, перевод в безопасный режим и так далее) из-за пожара, будет неприемлем для собственника объекта. В рассматриваемом примере правильным решением будет защита объема шкафа самосрабатывающим огнетушителем с передачей сигнала на пост дежурного.

Оба приведенных примера («А» и «Б») показывают, что наличие обязательной пожарно-технической классификации, дифференцирующей скорость выгорания пожарной нагрузки, могло бы стать исходными данными для принятия более оптимального технико-экономического решения при формировании системы пожарной безопасности объекта.

Еще одним направлением актуализации требований в области пожарной безопасности можно считать сложность формализации отступлений от норм добровольного применения. В соответствии с требованиями ч. 2 ст. 78 Федерального закона⁴ специальные технические условия (СТУ) готовятся на отсутствующие требования пожарной безопасности для зданий и сооружений. В рассматриваемых примерах речь идет об отступлении от нормативных требований добровольного применения. Расчетные обоснования для приведенных примеров на практике являются также затруднительными вследствие того, что обязательные требования пожарной безопасности не содержат количественных или качественных критериев, позволяющих определить достаточный уровень обеспечения сохранности имущества собственника от пожара.

Далее рассмотрим, каким образом предлагаемая пожарно-техническая классификация могла бы влиять на защиту объектов, размещенных в помещениях категорий «А» и «Б». Как отмечалось выше, для газобразных веществ и пылей критерия по удельной массовой скорости выгорания нет, и это обосновано. Очевидно, что для помещений категории «А» и «Б» наиболее вероятен взрыв и затем последующий пожар, поэтому говорить, что элементы системы пожарной безопасности, нацеленные на недопущение развития пожара или его тушение, могут помочь минимизировать потенциальный финансовый ущерб, возникший после взрыва, нельзя. Следовательно, само отсутствие критерия по удельной массовой скорости выгорания должно создать базу и задать направление для построения системы пожарной безопасности в сторону целей предотвращения взрыва, а не попыток спасения «того, что осталось» после взрыва.

Рассмотрим дополнительно примеры.

Согласно примеру «В», здание насосной для перекачки легковоспламеняющейся жидкости категории «А» площадью более 300 м². В здании размещена группа из трех перекачивающих центробежных насосов (два рабочих и один резервный). Насосы

приводятся в действие электрическими двигателями. В соответствии с действующими требованиями здание должно быть оборудовано автоматической установкой пожаротушения. Проведенный анализ пожарной опасности показал, что при появлении нежелательных исходных событий (разгерметизация насоса и появление источника зажигания с энергией, способной воспламенить перекачиваемую легковоспламеняемую жидкость) наиболее вероятен взрыв и избыточное давление взрыва способно нарушить соосность между центробежными насосами и электрическими двигателями, что потребует длительного останова насосной для ее последующего ремонта. Вариант развития пожара по сценарию «пожар пролива» стремится к нулю в силу физико-химических свойств перекачиваемой легковоспламеняемой жидкости. Очевидно, что в рассматриваемом примере «В» автоматическая установка пожаротушения не способна предотвратить потенциальный ущерб и не может являться эффективным техническим решением. Следовательно, собственнику объекта необходимо концентрировать свои затраты на недопущении образования облака топливно-воздушной смеси в границах нижнего (НКПР) и верхнего (ВКПР) концентрационных пределов распространения пламени (воспламенения) и недопущении появления источника зажигания. Как пример, одним из технических решений может быть не нормативное, а расчетное увеличение кратности воздухообмена аварийной вентиляции для недопущения образования облака топливно-воздушной смеси в значении, большем НКПР.

Вернемся к примеру, приведенному в начале статьи («А»). Предположим, что в границах пожарной секции наружной установки категории АН размещен колонный аппарат с обращающимся горючим газом под давлением высотой 18 м. Расстояние до соседней секции составляет нормативные 15 м. Анализ пожарной опасности показал, что при разгерметизации колонного аппарата наиболее вероятен взрыв облака топливно-воздушной смеси с последующим пожаром пролива. При этом расчетно определено, что давление взрыва разрушит технологическое оборудование, размещенное на соседней секции с неминуемой эскалацией аварии на соседнюю секцию. При описанном сценарии развития пожара сил и средств существующей пожарной части предприятия недостаточно и потребуются привлечение дополнительных сил и средств для ликвидации последствий пожара. Необходимо учитывать, что с точки зрения экономической целесообразности увеличение численности пожарной охраны предприятия нецелесообразно, так как ее возможные действия не смогут предотвратить ущерб, причиненный взрывом. Логично допустить, что собственнику объекта необходимо оснастить силы пожарной охраны техникой и оборудованием

для спасения людей, или, как минимум, сделать это направление в оснащении приоритетным. Данный пример показывает, что нормативные 15 м недостаточны для предотвращения эскалации аварии, при этом 15 м противопожарного расстояния — это увеличение «пятна застройки», увеличение землеотвода, удлинение связующих коммуникаций. Более правильным было бы отказаться от противопожарного расстояния между секциями, а сэкономленные средства потратить на повышение надежности оборудования (как основного технологического, так и систем противоаварийной защиты).

Выводы

Ряд рассмотренных примеров позволяет сделать следующие выводы:

- для твердых материалов и жидких веществ пожарно-техническая классификация по удельной массовой скорости выгорания веществ и материалов может стать основной при выборе наиболее эффективного способа тушения пожара. В данном случае максимальная эффективность — это минимальное время, требуемое для прекращения негативного воздействия на имущество собственника;
- для газообразных веществ и пылей невозможность установления значений по удельной скорости массового выгорания является основанием для оптимизации той части системы пожарной безопасности, которая направлена на тушение пожара, и усиления той части системы обеспечения пожарной безопасности, которая направлена на предупреждение аварии.

При этом всё следует понимать, что при горении твердых веществ и жидкостей собственник объекта может посредством системы пожарной безопасности физически управлять размерами причиненного вреда. Но при взрыве газообразных веществ и пылей собственник объекта может управлять посредством системы пожарной безопасности только вероятностью возникновения взрыва. При методологическом единстве практическая реализация определения требуемых затрат на систему пожарной безопасности будет разной [16, 17].

Учитывая, что предлагаемая классификация в первую очередь влияет на размер потенциального ущерба, право для определения качественных и количественных характеристик должно быть закреплено за собственником имущества. При этом решение собственника объекта должно иметь характер обязательных требований и должно быть закреплено на уровне федерального законодательства.

По мнению авторов исследования, качественная характеристика должна на базовом уровне классифицировать твердые, жидкие, газообразные вещества и пыли по признаку их наличия. Для твердых

и жидких веществ «присутствует», для газообразных веществ «отсутствует». Первая квалификация определит основной путь развития системы пожарной и промышленной безопасности для объекта защиты.

Рассматривая качественно-количественную характеристику, необходимо отметить, что она будет неодинакова, даже в пределах одной производственной площадки для разных объектов защиты. Качественно-количественная характеристика своей классификацией должна определять целесообразность использования элемента пожарной безопасности, основанную на сопоставлении скорости тушения пожара и скорости причинения вреда имуществу (для твердых и жидких веществ). Для газообразных веществ и пылей сравнение должно быть основано на сопоставлении вероятности возникновения аварии и стоимости элемента противопожарной защиты, направленной на предотвращение рассматриваемой аварии.

В описанных случаях качественно-количественная характеристика может быть «применимо» или «не применимо». Количественная составляющая качественно-количественной характеристики должна определяться собственником имущества самостоятельно, и, в принципе, результаты количественной составляющей должны быть внутренним бизнес-процессом собственника имущества [18–20].

Например, собственник объекта считает для себя приемлемым ущерб, который повлечет за собой пожар продолжительностью не более 5 мин (предположим, до 500 тысяч рублей). Время прибытия первого пожарного подразделения и его развертывания составляет не менее 8 мин. Соответственно, время реагирования любой части системы пожарной безопасности более 5 мин собственником классифицируется как «неприемлемое», и как альтернативное решение, отвечающее требованиям собственника, рассматривается автоматическая установка пожаротушения или автоматическая система обнаружения пожара, с передачей сигнала на пост охраны.

И в заключение пример, когда собственник объекта, проведя анализ пожарной опасности объекта и рассчитав вероятность гибели людей (предположим, 10^{-5}), установил, что для него допустимо принять вероятность гибели имущества 10^{-2} . Проанализировав вероятность эффективной работы предусмотренных систем промышленной безопасности, собственник объекта принял решение, что вероятность гибели имущества 10^{-2} может быть достигнута проведением дополнительного неразрушающего контроля сварных швов, и при этом допустимо отказаться от приобретения дорогостоящего пожарного автомобиля пенного тушения.

Таким образом, разработанные рекомендации по совершенствованию процесса формирования отдельных норм пожарной безопасности могут быть

применены для расширения научно-практической информации в области методологии, определяющей основание для принятия актуальных требований и мер пожарной безопасности, а также риск-ориентированного управления пожарным риском на объектах защиты.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. *Смелков Г.И., Пехотиков В.А., Рябиков А.И., Назаров А.А.* Актуализация национальной нормативной базы в области обеспечения пожарной безопасности электропроводок // *Безопасность труда в промышленности*. 2020. № 11. С. 29–36. DOI: 10.24000/0409-2961-2020-11-29-36. EDN MWQAWY.
2. *Лисанов М.В., Агапов А.А., Зайнетдинов С.Х., Сумской С.И., Софьин А.С.* Актуализация руководств по безопасности в области оценки риска аварий на производственных объектах // *Безопасность труда в промышленности*. 2023. № 7. С. 85–92. DOI: 10.24000/0409-2961-2023-7-85-92. EDN VHMXXR.
3. *Махутов Н.А., Резников Д.О., Лисанов М.В.* Нормирование и управление рисками, связанными с эксплуатацией опасных производственных объектов // *Безопасность труда в промышленности*. 2020. № 12. С. 85–91. DOI: 10.24000/0409-2961-2020-12-85-91. EDN QOLKYW.
4. *Гражданкин А.И., Печеркин А.С., Сидоров В.И.* О возможности единых и контрпродуктивности одинаковых критериев оценки риска промышленной аварии // *Безопасность труда в промышленности*. 2023. № 10. С. 36–44. DOI: 10.24000/0409-2961-2023-10-36-44. EDN ILYUTX.
5. *Kodur V., Kumar P., Rafi M.M.* Fire hazard in buildings: review, assessment and strategies for improving fire safety // *PSU Research Review*. 2020. No. 4 (1). Pp. 1–23. DOI: 10.1108/PRR-12-2018-0033
6. *Алексеев С.Г., Гурьев Е.С., Полуян Л.В., Барбин Н.М.* О показателях пожаровзрывоопасности // *Безопасность труда в промышленности*. 2020. № 6. С. 40–45. DOI: 10.24000/0409-2961-2020-6-40-45. EDN ATLTMU.
7. *Романенко А.И., Тараканова В.В., Тертычная С.В.* Применение программного обеспечения при расчетах по пожарной безопасности // *XXI век: итоги прошлого и проблемы настоящего плюс*. 2022. № 11. Т. 3 (59). С. 165–169. DOI: 10.46548/21vek-2022-1159-0025. EDN JALJNF.
8. *Сурина Г.П., Порошин А.А., Васильева Л.В.* Программные средства для расчета численности персонала пожарной охраны промышленных предприятий с учетом функционирования инженерных систем противопожарной защиты // *Сибирский пожарно-спасательный вестник*. 2021. № 2 (21). С. 85–89. DOI: 10.34987/vestnik.sibpsa.2021.82.81.015. EDN JNEQHS.
9. *Королев Д.С., Вытовтов А.В., Епифанов Е.Н.* Исследование процесса протекания пожара на действующем объекте защиты и оценка различных опасных воздействий на людей // *Безопасность жизнедеятельности*. 2023. № 11 (275). С. 21–26. EDN XSXQVW.
10. *Avdeeva M., Byzov A., Smyshlyaeva K., Leonova N.* Assessment of the fire situation of a certain building using fenix+ // *Advances in Intelligent Systems and Computing*. 2021. No. 1259. Pp. 391–400. DOI: 10.1007/978-3-030-57453-6_35. EDN LHETMF.
11. *Скрипник И.Л., Дементьев Ф.А., Савельев Д.В., Булатов В.О.* Анализ разных подходов при расчете динамики опасных факторов пожара с использованием компьютерных технологий // *Техносферная безопасность*. 2024. № 1 (42). С. 47–57. EDN WITIHU.
12. *Pasnak I., Prydatko O., Gavrilyk A.* Development of algorithms for efficient management of fire rescue units // *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*. 2016. No. 3 (81). Pp. 22–28. DOI: 10.15587/1729-4061.2016.71604. EDN WIQVUR.
13. *Farhadzadeh E.M., Muradaliyev A.Z., Ismailova S.M., Yusifli R.F.* Computer Technology of Formation Control Samples of Fire Safety Rules of Objects Electro Power Systems // *Reliability: Theory & Applications*. 2019. No. 14. Vol. 2 (53). Pp. 10–18. DOI: 10.24411/1932-2321-2019-12001. EDN RPTLLR.
14. *Kyrylaha N., Chernenko V.* Fire risk assessment in light of socio-economic factors // *Економічний часопис-XXI*. 2017. No. 166 (7–8). Pp. 37–40. DOI: 10.21003/ea.V166-07. EDN ZWNXID.
15. *Cortés D., Gil D., Azorín J., Vandecasteele F., Verstockt S.* A review of modelling and simulation methods for flashover prediction in confined space fires // *Applied Sciences (Switzerland)*. 2020. No. 10 (16). P. 5609. DOI: 10.3390/app10165609. EDN WXBXPL.
16. *Granovskiy E.A., Lyfar V.A., Vorona A.P., Barbuca I.M., Jarosz W.* Modelling the evacuation during fires of buildings — the risk analysis // *Bezpieczenstwo i Technika Pożarnicza*. 2011. No. 24 (4). Pp. 59–63. EDN TEHGSP.
17. *Shikhalev D.V.* Problems of managing the fire safety system of a facility. Part I: assessment methods // *Control Sciences*. 2022. No. 1. Pp. 2–14. DOI: 10.25728/cs.2022.1.1. EDN JGJIKV.
18. *Софьин А.С., Агапов А.А., Буйновский С.А., Каныгин П.С., Авдеев А.С.* Опыт внедрения системы прогнозирования последствий аварий в режиме реального времени ТОХИ+Прогноз на производстве аммиака и кар-

бамида // Безопасность труда в промышленности. 2020. № 12. С. 66–73. DOI: 10.24000/0409-2961-2020-12-66-73. EDN HNHXHF.

19. Гвоздев Е.В. Постановка и решение задачи по развитию системы комплексной безопасности на взрывопожароопасных производственных объектах предприятий // Безопасность труда в промышленности. 2023. № 10. С. 45–53. DOI: 10.24000/0409-2961-2023-10-45-53. EDN NGMGLG.
20. Савельев А.П., Шкрабак В.С., Готов С.В., Еналеева С.А., Чузунов А.М., Шкрабак Р.В. Обоснование условий функционирования складов нефтепродуктов предприятия АПК в соответствии с требованиями пожарной безопасности // Аграрный научный журнал. 2023. № 6. С. 136–146. DOI: 10.28983/asj.y2023i6pp136-146. EDN DDFUKU.

REFERENCES

1. Smelkov G.I., Pekhotikov V.A., Ryabikov A.I., Nazarov A.A. Updating of the national normative base in the field of ensuring fire safety of electrical wiring. *Occupational safety in industry*. 2020; 11:29-36. DOI: 10.24000/0409-2961-2020-11-29-36. EDN MWQAWY. (rus).
2. Lisanov M.V., Agapov A.A., Zaynetdinov S.Kh., Sumskey S.I., Sofyin A.S. Updating safety guides in the field of accident risk assessment at the production facilities. *Occupational safety in industry*. 2023; 7:85-92. DOI: 10.24000/0409-2961-2023-7-85-92. EDN VHMXXR. (rus).
3. Makhutov N.A., Reznikov D.O., Lisanov M.V. Risk regulation and management related to the operation of hazardous production facilities. *Occupational safety in industry*. 2020; 12:85-91. DOI: 10.24000/0409-2961-2020-12-85-91. EDN QOLKYW. (rus).
4. Grazhdankin A.I., Pecherkin A.S., Sidorov V.I. On the possibility of uniform and counterproductive identical criteria for assessing the risk of an industrial accident. *Occupational safety in industry*. 2023; 10:36-44. DOI: 10.24000/0409-2961-2023-10-36-44. EDN ILYUTX. (rus).
5. Kodur V., Kumar P., Rafi M.M. Fire hazard in buildings: review, assessment and strategies for improving fire safety. *PSU Research Review*. 2020; 4(1):1-23. DOI: 10.1108/PRR-12-2018-0033
6. Alekseev S.G., Guryev E.S., Poluyan L.V., Barbin N.M. About fire and explosion hazard indicators. *Occupational safety in industry*. 2020; 6:40-45. DOI: 10.24000/0409-2961-2020-6-40-45. EDN ATLTMU. (rus).
7. Romanenko A.I., Tarakanova V.V., Tertychnaya S.V. Software application for the fire safety calculations. *XXI century: resumes of the past and challenges of the present plus*. 2022; 11:3(59):165-169. DOI: 10.46548/21vek-2022-1159-0025. EDN JALJNF. (rus).
8. Surina G.P., Poroshin A.A., Vasilyeva L.V. Software for calculating the number personnel of fire brigades of an industrial enterprises, taking into account the functioning of engineering fire protection systems. *Siberian Fire and Rescue Bulletin*. 2021; 2(21):85-89. DOI: 10.34987/vestnik.sibpsa.2021.82.81.015. EDN JNEQHS. (rus).
9. Korolev D.S., Vytovtov A.V., Epifanov E.N. Investigation of the fire process at the operating object of protection and assessment of various hazardous effects on people. *Life Safety*. 2023; 11(275):21-26. EDN XSXQVW. (rus).
10. Avdeeva M., Byzov A., Smyshlyaeva K., Leonova N. Assessment of the fire situation of a certain building using fenix+. *Advances in Intelligent Systems and Computing*. 2021; 1259:391-400. DOI: 10.1007/978-3-030-57453-6_35. EDN LHETMF.
11. Skripnik I.L., Dementiev F.A., Savelyev D.V., Bulatov V.O. Analysis of calculation procedures for determination of fire hazards using computer technologies. *Technosphere safety*. 2024; 1(42):47-57. EDN WITIHU. (rus).
12. Pasnak I., Prydatko O., Gavrilyk A. Development of algorithms for efficient management of fire rescue units. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*. 2016; 3(81):22-28. DOI: 10.15587/1729-4061.2016.71604. EDN WIQVUR.
13. Farhadzadeh E.M., Muradaliyev A.Z., Ismailova S.M., Yusifli R.F. Computer Technology of Formation Control Samples of Fire Safety Rules of Objects Electro Power Systems. *Reliability: Theory & Applications*. 2019; 14:2(53):10-18. DOI: 10.24411/1932-2321-2019-1201. EDN RPTLLR.
14. Kyrylaha N., Chernenko V. Fire risk assessment in light of socio-economic factors. *Economic magazine-XXI*. 2017; 166(7-8):37-40. DOI: 10.21003/ea.V166-07. EDN ZWNXID.
15. Cortés D., Gil D., Azorín J., Vandecasteele F., Verstockt S. A review of modelling and simulation methods for flashover prediction in confined space fires. *Applied Sciences (Switzerland)*. 2020; 10(16):5609. DOI: 10.3390/app10165609. EDN WXBXPL.
16. Granovskiy E.A., Lyfar V.A., Vorona A.P., Barbuca I.M., Jarosz W. Modelling the evacuation during fires of buildings — the risk analysis. *Bezpieczenstwo i Technika Pozarnicza*. 2011; 24(4):59-63. EDN TEHGSP.
17. Shikhalev D.V. Problems of managing the fire safety system of a facility. Part I: assessment methods. *Control Sciences*. 2022; 1:2-14. DOI: 10.25728/cs.2022.1.1. EDN JGJIKV.

18. Sofyin A.S., Agapov A.A., Buinovskiy S.A., Kanygin P.S., Avdeev A.S. Experience in implementing a real-time accident forecast system *toxi+prognosis* for the production of ammonia and carbamide. *Occupational safety in industry*. 2020; 12:66-73. DOI: 10.24000/0409-2961-2020-12-66-73. EDN HNHXXF. (rus).
19. Gvozdev E.V. Setting and solving the problem of developing an integrated safety system at the explosion and fire-hazardous production facilities of the enterprise. *Occupational safety in industry*. 2023; 10:45-53. DOI: 10.24000/0409-2961-2023-10-45-53. EDN NGMGLG. (rus).
20. Savelyev A.P., Shkrabak V.S., Glotov S.V., Enaleeva S.A., Chugunov A.M., Shkrabak R.V. Optimization of fire safety measures at the agribusiness protection facility with a mass stay of people. *The Agrarian Scientific Journal*. 2023; 6:136-146. DOI: 10.28983/asj.y2023i6pp136-146. EDN DDFUKU. (rus).

Поступила 26.09.2025, после доработки 17.11.2025;

принята к публикации 5.12.2025

Received September 26, 2025; Received in revised form November 17, 2025;

Accepted December 5, 2025

Информация об авторах

АЛЕКСАНДРОВА Анна Владимировна, к.т.н., доцент, доцент кафедры безопасности жизнедеятельности, Кубанский государственный технологический университет (КубГТУ), Россия, 350072, г. Краснодар, ул. Московская, 2; SPIN-код: 6617-6500; ORCID: 0000-0002-3394-5786; e-mail: alexanna@mail.ru

ПОПКО Роман Евгеньевич, старший преподаватель кафедры безопасности жизнедеятельности, Кубанский государственный технологический университет (КубГТУ), Россия, 350072, г. Краснодар, ул. Московская, 2; главный инженер проектов, ООО «Спектр ПБ», Россия, 350049, г. Краснодар, ул. им. Котовского, 42; SPIN-код: 6523-8548; ORCID: 0009-0009-5190-808X; e-mail: popko-r@mail.ru

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

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Information about the authors

Anna V. ALEKSANDROVA, Cand. Sci. (Eng.), Associate Professor, Associate Professor of the Department of Life Safety, Kuban State Technological University (KubSTU), Moskovskaya St., 2, Krasnodar, 350072, Russian Federation; SPIN-code: 6617-6500; ORCID: 0000-0002-3394-5786; e-mail: popko-r@mail.ru

Roman E. POPKO, Senior Lecturer of the Department of Life Safety, Kuban State Technological University (KubSTU), Moskovskaya St., 2, Krasnodar, 350072, Russian Federation; Chief Engineer of Projects, Spectrum PB LLC, Kотовского St., 42, Krasnodar, 350049, Russian Federation; SPIN-code: 6523-8548; ORCID: 0009-0009-5190-808X; e-mail: popko-r@mail.ru

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

The authors declare no conflicts of interests.

ПОЖАРОВЗРЫВОБЕЗОПАСНОСТЬ/FIRE AND EXPLOSION SAFETY. 2025. Т. 34. № 6. С. 67–76
POZHAROVZRYVOBEZOPASNOST/FIRE AND EXPLOSION SAFETY. 2025; 34(6):67-76

ОБЗОРНО-АНАЛИТИЧЕСКАЯ СТАТЬЯ/REVIEW AND ANALYTICAL ARTICLE

УДК 514.841.12

<https://doi.org/10.22227/0869-7493.2025.34.06.67-76>

Международный опыт обеспечения пожарной безопасности применения литий-ионных батарей

Юрий Николаевич Шебеко ✉

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. Проведено обоснование необходимости анализа международного опыта обеспечения пожарной безопасности применения литий-ионных батарей (ЛИБ). Актуальность статьи обусловлена большим количеством инцидентов с пожарами и взрывами на объектах различного назначения, где применяются ЛИБ. Целью работы является аналитический обзор исследований в области всевозможных аспектов пожарной безопасности использования ЛИБ в различных странах мира.

Анализ имевших место аварий и пожаров с участием литий-ионных батарей. Проанализированы имевшие место в мировой практике эксплуатации ЛИБ аварии с пожарами и взрывами. Выявлены три группы условий возникновения упомянутых инцидентов: перегрев или воздействие внешнего пламени, излишний заряд или короткое замыкание, механическое разрушительное воздействие.

Условия возникновения и развития аварий ЛИБ. Описаны основные явления, реализующиеся при авариях ЛИБ. При аварии происходит неконтролируемый нагрев содержимого батареи с образованием большого количества горючих газов, зажигание которых приводит к сгоранию образовавшейся газовой смеси, в том числе и в режиме взрыва. В составе этих газов зарегистрированы водород, метан, этилен, пропан и более тяжелые углеводороды. На вероятность возникновения аварии в значительной степени влияет уровень заряда батареи — чем он выше, тем более вероятна авария и больше ее последствия.

Методы ликвидации аварий и пожаров литий-ионных батарей. Отмечена важная роль аварийной вентиляции в предотвращении образования взрывоопасных газозвушных смесей. Тушение пожаров ЛИБ существенно осложняется тем обстоятельством, что самоускоряющиеся химические реакции внутри аварийной батареи могут протекать без доступа воздуха. Поэтому применение газовых средств пожаротушения может привести к повторным воспламенениям после ликвидации первоначального очага пламени, если не произвести необходимое охлаждение горячей батареи. В силу этого наиболее подходящим средством пожаротушения является вода.

Выводы. На основании проведенного анализа сделан вывод, что аварии и пожары ЛИБ обусловлены протеканием самоускоряющихся реакций в электролите батареи. При этом, помимо выделения тепла, образуется большое количество горючих газов. Отмечено, что в качестве средства пожаротушения рекомендуется применение воды.

Ключевые слова: самоускоряющиеся реакции; горючие газы; уровень заряда батареи; аварийная вентиляция; средства пожаротушения

Для цитирования: Шебеко Ю.Н. Международный опыт обеспечения пожарной безопасности применения литий-ионных батарей // Пожаровзрывобезопасность/Fire and Explosion Safety. 2025. Т. 34. № 6. С. 67–76. DOI: 10.22227/0869-7493.2025.34.06.67-76

✉ Шебеко Юрий Николаевич, e-mail: yn_shebeko1@mail.ru

International experience in ensuring fire safety using lithium-ion batteries

Yury N. Shebeko ✉

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 necessity of analyzing international experience in ensuring fire safety in the use of lithium-ion batteries (LIB) was substantiated. The relevance of the paper is due to the large number of incidents involving fires and explosions at various facilities where LIB are used. The aim of the work is to provide an analytical review of research in the field of all possible aspects of fire safety in the use of LIB in different countries around the world.

Analysis of LIB accidents with fires and explosions. The accidents with fires and explosions taking place at LIB applications were analyzed. The three types of conditions leading to the LIB accidents were revealed: overheating or flame action; overcharge or short circuit; mechanical destruction.

Conditions of an initiation and evolution of LIB accidents. Main phenomena taking place at the LIB accidents were described. A thermal runaway with heating and decomposition of the electrolyte with a generation of high quantities of flammable gases occurs. An ignition of these gases may cause an explosion with the following fire. These gases can include hydrogen, carbon monoxide, methane, ethylene, propane and other hydrocarbons. A state of charge (SOC) of a battery influences strongly the consequences of the accident – the higher is SOC the more probable is the accident and the heavier are its consequences.

Methods for elimination of LIB accidents and fires. It was mentioned that an extinguishing of LIB fires is complicated by the circumstance that self-accelerating runaway reactions inside batteries proceed without a presence of oxygen. Therefore an application of gaseous, powder and aerosol fire extinguishing agents can lead to secondary ignitions after a liquidation of a flame if the necessary cooling of the battery is not made. A conclusion is made that water is more suitable and reliable agent for a fire extinguishing of LIB.

Conclusions. Based on the analysis, it was concluded that accidents and fires involving LIBs are caused by self-accelerating reactions in the battery electrolyte. In addition to heat release, this process generates a large amount of combustible gases. It was noted that water is recommended as a fire extinguishing agent.

Keywords: self-accelerating reactions; flammable gases; state of charge; accidental ventilation; fire extinguishing agents

For citation: Shebeko Yu.N. International experience in ensuring fire safety using lithium-ion batteries. *Pozharovzryvo-bezopasnost/ Fire and Explosion Safety*. 2025; 34(6):67-76. DOI: 10.22227/0869-7493.2025.34.06.67-76 (rus).

✉ Yury Nicolaevich Shebeko, e-mail: yn_shebeko1@mail.ru

Введение

В последние годы во многих странах мира существенно расширяется производство и использование литий-ионных батарей (ЛИБ). ЛИБ имеют ряд преимуществ по сравнению с другими видами батарей: высокая объемная плотность запасенной энергии, постоянство напряжения в процессе использования, большой срок эксплуатации, хорошие характеристики при работе в условиях низких температур. Эти батареи широко применяются в транспортной отрасли (в том числе в авиации) и других отраслях, где требуется использование источников тока с большим требуемым временем работы в режиме разряда. Однако их применение при несоблюдении требований безопасности может приводить к их воспламенению или взрывам. При этом тушение ЛИБ затруднено тем обстоятельством, что происходящие внутри батареи химические реакции саморазогрева при аварии не требуют присутствия кислорода воздуха. Проблема обеспечения пожарной безопасности применения литий-ионных батарей исследуется как российскими (см., например, работы [1–5]), так и зарубежными учеными. Настоящая работа посвящена анализу работ в направлении решения указанной проблемы, выполненных зарубежными исследователями.

Анализ аварий и пожаров с участием литий-ионных батарей

Как отмечено выше, в аварийных условиях эксплуатации ЛИБ могут воспламеняться. Согласно [6, 7], аварийные условия делятся на три группы:

1) перегрев (в том числе при воздействии внешнего источника);

2) излишний заряд или короткое замыкание;
3) механическое разрушительное внешнее воздействие.

При этом происходит неконтролируемый саморазогрев содержимого батареи с образованием большого количества горючих газов. Ключевыми с точки зрения последствий аварии являются процессы тепловыделения с образованием горючих газозвушных смесей, зажигание которых приводит к взрыву в помещении, где размещена батарея. По указанному сценарию протекала большая часть аварий, имевших место на практике. В работе [6] приведены краткие описания 13 наиболее характерных инцидентов с участием ЛИБ, имевших место на практике в период с 2011 по 2023 г. и сопровождавшихся пожарами и взрывами.

В работе [7] со ссылкой на документ¹ отмечены 75 инцидентов с ЛИБ, имевших место в период с 2021 по 2023 г., приведших к пожарам и взрывам. Описаны некоторые характерные аварии. В 2019 г. в штате Аризона (США) произошел инцидент с ЛИБ на одном из предприятий. Начался аварийный нагрев батареи, и через 3 часа после этого пожарные приступили к ликвидации инцидента. После открытия двери помещения с аккумуляторами произошел взрыв, приведший к поражению пожарных. Отмечена необходимость разработки обоснованных планов пожаротушения объектов с наличием ЛИБ, учитывающих особенности таких пожаров. Требуется также корректировка нормативных документов для данных объектов, предусматривающая устройство аварийной вентиляции с требуемой производительностью, а также оснащение помещений датчиками

¹ EPRI. Electric Power Research Institute. 2024. BESS Failure Event Database.

довзрывоопасных концентраций и легкообрасываемыми конструкциями.

Согласно работе [7], в 2019 г. в Норвегии на пароме с гибридным приводом (электроэнергия и дизельное топливо) в вечернее время произошел пожар в помещении с ЛИБ, который был потушен. На следующее утро пожарные открыли люк помещения для проветривания. При этом температура в помещении начала расти. Через 2 часа после этого в помещении произошел взрыв, вызвавший серьезные разрушения парома. Аналогичный инцидент имел место в Норвегии в 2021 г. в электропомещении парома с наличием ЛИБ. Пожарные с учетом уроков предыдущей аварии вначале подали в помещении азот и лишь затем стали проводить его вентилирование. Описан также инцидент, имевший место в двухквартирном доме, в котором в подвальном помещении имелись ЛИБ. Было обнаружено задымление, но прибывшие пожарные не обнаружили очага горения. После этого в помещении, где располагались ЛИБ, произошел взрыв.

В работе [8] отмечен рост в 5 раз в Ванкувере (Канада) с 2012 по 2022 г. инцидентов, сопровождающихся неконтролируемым нагревом ЛИБ. В работе [9] указано, что в период с 2006 по 2014 г. имело место множество случаев пожаров и взрывов мобильных телефонов, оснащенных ЛИБ. По этой причине в 2016 г. мобильные телефоны одной из компаний были отозваны с рынка. Обзор аварий с пожарами и взрывами электромобилей, вызванными неконтролируемыми самоускоряющимися реакциями в ЛИБ, дан в работе [10].

В работе [11] анализируется инцидент с пожаром и взрывом в здании аккумуляторной с наличием ЛИБ, произошедший 16.04.2021 г. в Пекине и приведший к человеческим жертвам и существенным экономическим потерям. Двое пожарных погибли, один ранен, ущерб составил более 16 млн юаней. В инцидент были вовлечены два кирпичных здания и соединяющий их подземный кабельный тоннель. В обоих зданиях размещались ЛИБ, причем перегрев батареи произошел в одном здании, а взрыв — в другом. Причиной перегрева стало короткое замыкание, при этом в результате самоускоряющихся реакций в ЛИБ в одном здании произошло образование дыма и горючих газов, которые по тоннелю распространились в другое здание. Путем произведенной реконструкции инцидента установлено, что в начальный период перегрева выделялись пары метилэтилкарбоната, а в последующей стадии образовывались горючие газы (водород, оксид углерода, метан, диоксид углерода, ацетилен). Установлено, что все 103 680 батарей в аварийном здании приняли участие в выделении горючих газов, поступивших по тоннелю в соседнее здание и вызвавших взрыв через примерно 8500 с после начала аварии.

Оценки показали, что масса выделившихся газов составила 52,7 кг, давление взрыва — 70 кПа, что вызвало разрушение здания. Характерный размер пламени при взрыве был около 15 м. По результатам расследования было предложено обратить внимание на обоснование генерального плана и объемно-планировочных решений объекта, установку газосигнализаторов, устройство аварийной вентиляции с требуемой производительностью, применение легкообрасываемых конструкций.

6 сентября 2025 г. в г. Тэджон (Южная Корея) около 20:15 в главном дата-центре Национальной службы информационных ресурсов при переноске аккумуляторов произошел пожар. Первоначально загорелась одна батарея, затем пламя быстро распространилось по всей батарейной зоне. В тушении пожара приняли участие более 200 пожарных. К утру 27 сентября основной очаг пожара был ликвидирован. Выгорело 384 батарейных модуля. К середине дня пожарные извлекли около трети из них — примерно 133 единицы. Каждый батарейный модуль поштучно охлаждали в емкостях с водой. Один из пожарных получил ожоги лица и рук. Основной ущерб нанесен системам поддержания микроклимата. Их остановка вынудила обесточить весь центр, отключив 647 систем — и те, что пострадали от пожара напрямую, и те, что физически остались целыми.

Закономерности возникновения и развития самоускоряющихся аварийных процессов в литий-ионных батареях

В работе [12] отмечены характерные причины и иницирующие события для взрывов ЛИБ:

- внешние: деформация батареи, излишний заряд, внешний нагрев;
- внутренние: примеси иных, кроме лития, металлов, нестабильность катода или анода, короткое замыкание внутри батареи.

Аварийный процесс в ЛИБ начинается с увеличения температуры какой-либо из ячеек батареи независимо от вида иницирующего события. Далее происходит разложение компонентов батареи в самоускоряющемся режиме с генерацией тепла и образованием горючих газов, которые при своем расширении выходят за пределы батареи, образуя взрывоопасные смеси с воздухом в объеме помещения. Проведены эксперименты, имитирующие газовые взрывы при размещении ЛИБ внутри камеры объемом 19,7 л, снабженной датчиками давления. В камере создавали горючие смеси H_2 , CH_4 , C_3H_8 , C_2H_4 с воздухом, типичные для случая аварийного газовыделения при саморазогреве ЛИБ. Определяли максимальное давление взрыва и максимальную скорость нарастания давления взрыва. Характерные

значения этих параметров составили 0,44–0,51 МПа и 2,3–8,4 МПа/с.

В работе [6] представлены результаты анализа механизмов возникновения инцидентов с ЛИБ и методов противопожарной защиты объектов с наличием таких батарей. Представлены данные по газовой выделению и возникновению саморазогрева батарей различных типов. Основным горючим компонентом этих газов является водород, содержание которого составляет около 30 % (об.). Содержание диоксида углерода колеблется в промежутке от 22,9 до 53 % (об.) в зависимости от типа электролита. Концентрация оксида углерода может достигать 27,6 % (об.). Суммарная концентрация остальных компонентов, выделяющихся при саморазогреве батареи газов (CH_4 , C_2H_6 , C_3H_8 , C_2H_4 и др.), составляет от 10 до 34 % (об.) в зависимости от типа батареи и степени ее заряда. При инициировании процесса нагрева ячейки в центре батареи ускоряющаяся реакция распространяется на другие ячейки.

Описан эксперимент по инициированию процесса саморазогрева ЛИБ, содержащей 14 400 ячеек при степени заряда 100 %. Саморазогрев инициировали двумя методами: внешним (пропановая горелка) и внутренним источником. Найдено, что в процессе саморазогрева температура внутри ячейки может достигать величины 1093 °С. Температура наружных ячеек существенно ниже и не может привести к зажиганию окружающих предметов, расположенных на расстоянии более 1,8 м от батареи. Отмечено, что безопасность применения ЛИБ может быть обеспечена соответствующей конструкцией батареи, соблюдением требуемых условий эксплуатации и использованием средств противопожарной защиты.

В работе [9] отмечено, что одной из причин аварий ЛИБ является разрушение тонкой оболочки (толщина порядка 30 мкм), разделяющей анод и катод, с коротким замыканием и дальнейшим саморазогревом батареи. При этом из-за разложения сольвента, используемого в качестве электролита, могут образовываться горючие газы. Для оценки устойчивости батареи к внешнему силовому воздействию Международный стандарт² регламентирует необходимость испытаний батареи по отношению к разрушающему воздействию. Предложен новый метод механического воздействия на ЛИБ с помощью углового элемента из пластика в форме ножа с углом 90°. Гидравлический пресс, осуществляющий воздействие, вмонтирован в камеру объемом 20 л. Скорость движения углового элемента состав-

² IEC 62133 “Secondary cells and batteries containing alkaline or other non-acid electrolytes — safety requirements for portable sealed secondary cells, and for batteries made from them, for use in portable applications”.

Основные результаты эксперимента
The main results of the experiment

Вид воздействия Type of impact	Количество опытов с зажиганием Number of ignition experiments	Количество опытов без зажигания Number of experiments without ignition
Медленное Slow	6	4
Быстрое Quick	3	7

ляет 5 мм/с (высокая) и 0,5 мм/с (низкая). Камера заполнялась метановоздушной смесью с концентрацией CH_4 6,5 % (об.). Для сравнения использовали воздействие не угловым, а плоским элементом. Фиксировали возникновение саморазогрева батареи при силовом воздействии. Основные результаты эксперимента приведены в таблице.

Работа [13] посвящена исследованию газовой выделению при перегреве ЛИБ. Найдено, что значительную часть образующихся продуктов составляют горючие газы. Со ссылкой на работу [14] указано, что нижний концентрационный предел распространения пламени выделяющихся газов составляет от 6,1 до 10,0 % (об.) в зависимости от типа батареи и уровня ее заряда (SOC — state of charge). Отмечено, что чем выше SOC, тем больше количество выделяющихся газов. В зависимости от типа батареи и SOC эти газы содержат такие компоненты, как H_2 , CO , O_2 , N_2 , CH_4 , C_2H_6 , C_3H_8 , C_2H_4 и более тяжелые углеводороды, а также HF. Проанализировано 29 экспериментов по изучению газовой выделению при перегреве ЛИБ емкостью от 1,1 до 50 А·ч при уровне заряда от 0 до 140 %. Выявлена зависимость НКПР выделяющихся газов от SOC для батарей различных типов. Найдено, что при увеличении SOC от 20 до 140 % величина НКПР снижается со значений 15–35 % (об.) до величин 5–10 % (об.) в зависимости от типа батареи. При этом величина минимальной взрывоопасной концентрации кислорода находится в диапазоне от 8 до 11 % (об.).

В работе [15] отмечено, что разработаны надежные ЛИБ, для которых частота аварий не превышает 1 на 10^6 батарей в год при условии их правильной эксплуатации. Отмечено, что среди проведенных ранее исследований сравнительно мало экспериментов по изучению саморазогрева батарей большой емкости. В связи с этим изучаются ЛИБ большой емкости (50 А·ч), состоящие из 5 ячеек емкостью 10 А·ч каждая. Измеряли такие параметры, как потеря массы, скорость тепловыделения HRR, температура в зависимости от SOC. Величину HRR вычисляли по скорости расходования кислорода в атмосфере испытательной камеры. Нагрев батареи производили с помощью радиационной панели мощностью 3 кВт, расстояние от которой до изучаемого объекта состав-

ляло 100 мм. Измеряли концентрации O_2 , CO , CO_2 в процессе нагрева батареи. Отмечены следующие стадии деградации батареи.

1. Расширение батареи за счет теплового воздействия и выделяющихся газов.
2. Приблизительно через 1500 с (в зависимости от SOC) появляется интенсивное струевое пламя газов, выделившихся в результате нагрева батареи.
3. Стационарное горение всех 5 ячеек батареи.
4. Возникает более интенсивное струевое пламя.
5. Через промежуток времени 2100–3200 с в зависимости от величины SOC происходит снижение интенсивности горения и гашение пламени.

Длина струевого пламени составляла 963, 519 и 549 мм для величины SOC 100, 50 и 0%. Полное время горения было равно 591, 629 и 1710 с для указанных выше значений SOC. Максимальная величина мощности тепловыделения (49 кВт) и максимальная температура пламени (1500, 1020 и 1091 °C для SOC 100, 50 и 0%) реализуются во второй стадии процесса. Найдено, что интенсивный само-разогрев батареи начинается при ее температуре 175–185 °C.

В работе [16] описаны испытания ЛИБ по оценке их пожарной опасности с целью изучения возможности их применения в авиации. Проведена оценка реакции батарей на пожар. Результаты экспериментов показали, что ЛИБ могут интенсивно реагировать на пламя. Ячейки батареи при нагреве раскрываются с распылением электролита и выделением горючих газов, что приводит к интенсификации пожара. Выполнены испытания трех видов батарей в камере объемом 1,8 м³. На батарею, состоящую из 8 ячеек при степени заряда 100%, воздействовали пламенем пропана. Регистрировали температуру газовой среды в 4 точках и производили видеосъемку. Изучали также воздействие на батарею короткого замыкания, а также факельного горения смеси C_2H_2/O_2 . Найдено, что при воздействии пламени на батарею, состоящую из 1,4 и 8 ячеек, происходило повышение их температуры до значений 21, 316 и 418 °C, при которых происходило разрушение ячеек с выбросом электролита. При коротком замыкании батареи в условиях SOC = 100% происходил лишь нагрев батареи без выброса электролита. Характерные температуры воспламенения батарей составили 166–275 °C.

В работе [7] выполнены эксперименты по изучению газовой выделению в камере объемом 80 л при самонагревании ЛИБ при различных уровнях заряда SOC. Найдено, что с увеличением SOC концентрации H_2 и CO растут, а концентрация CO_2 падает. Появление водорода обусловлено реакциями атомов Li со связующим, а CO и CO_2 — разложением электролита. Общее количество газов, выделяю-

щихся при самонагревании батареи, существенно (в несколько раз) увеличивается с ростом SOC. Консервативная оценка объема выделившихся газов дает величину 0,5 л на 1 Вт·ч емкости батареи.

Проанализирован в части опасного газовой выделение проект пассажирского паром на электрической тяге между Швецией и Данией. Требуемая емкость батареи для этого паром составляет 60 МВт·ч. Для данного паром существует проблема обеспечения взрывобезопасности в связи с возможностью выделения горючих газов, которую предлагается решать путем применения аварийной вентиляции. Производительность этой вентиляции должна быть определена, исходя из возможности выделения горючих газов за несколько секунд при самоускоряющейся реакции в батарее. Модуль батареи емкостью 10 кВт·ч может в результате аварии генерировать около 5000 л газа, что в отсутствие вентиляции приведет к образованию горючей газовой смеси в объеме 100 м³ (в расчетах принята величина НКПР 5% (об.)). В этом случае требуемая производительность аварийной вентиляции очень велика, поэтому необходимо оснастить соответствующие помещения легкобросаемыми конструкциями (ЛСК). Имеется и проблема сочетания вентиляции с установками газового пожаротушения, для эффективной работы которых необходимо отключение вентиляции. Тушение пламени вызовет возрастание риска взрыва, а наличие пламени вызовет возрастание риска взрыва в корпусе батареи. Оценка требуемой для предотвращения образования взрывоопасной газовой смеси дает величину 6–50 объемов в час.

Величина производительности вентиляции должна соответствовать случаям реализации 3 сценариев:

- нормальная работа — 6 объемов в час;
- при обнаружении нештатной ситуации производительность должна быть увеличена до уровня, обеспечивающего взрывобезопасность при инциденте с одной ячейкой батареи;
- при регистрации в помещении предельно допустимых концентраций горючих газов должна включаться аварийная вентиляция, производительность которой должна быть определена отдельно в каждом конкретном случае.

При подтверждении возникновения пожара вентиляция должна быть отключена, при этом измерение концентраций горючих газов должно продолжаться. Принятие решений по реагированию на аварию должно быть основано на данных по концентрации горючих газов, визуальном контроле с помощью видеонаблюдения и информации о текущих параметрах батарей.

Сообщается о разработке руководства по устройству и эксплуатации аккумуляторных систем на основе

ЛИБ, основные положения которого заключаются в следующем:

- расположение батарей не должно препятствовать эвакуации людей при аварии или пожаре;
- помещения с наличием батарей должны быть оборудованы принудительной вентиляцией с учетом возможности аварии в одной или нескольких ячейках. Эта вентиляция должна быть обособлена от других систем вентиляции здания;
- помещение должно быть оснащено легкообъемными конструкциями;
- пожарная охрана должна иметь возможность удаления горючих газов из помещения без открывания дверей;
- для определения стратегии реагирования следует учитывать сценарии как с пожаром, так и без него.

Работа [17] посвящена определению номенклатуры и количества горючих газов, выделяющихся при аварии ЛИБ. Отмечена одна из наиболее характерных аварий, заключающаяся в возникновении самоускоряющейся реакции с выделением горючих газов. Реакция, начавшаяся в одной ячейке, может в результате ненормативного нагрева перейти на другие ячейки батареи. Выделение газов изучалось в зависимости от скорости нагрева, которая может составлять до нескольких сотен градусов в минуту. Выполнены эксперименты, в которых ЛИБ размещались в сферической камере объемом 20 л, оснащенной нагревателем батареи в виде нихромовой проволоки и датчиками давления, температуры и концентраций газов. Скорость нагрева батареи варьировалась от 10 до 80 °С в минуту. Найдено, что основными компонентами выделяющихся газов являются водород (27,4–38,9%), диоксид углерода (5,8–11,7%), оксид углерода (1,3–2,9%), углеводороды (13,6–17,4%), кислородсодержащие органические вещества (21,1–26,4%).

В работе [18] изучены показатели пожарной опасности сбросных газов, выделяющихся при авариях ЛИБ. Отмечено, что указанные аварии происходят при сверхрасчетных тепловых (self-accelerating), электрических или механических нагрузках. В процессе аварии генерируется большое количество горючих газов (водород, метан, этилен, оксид углерода и др.). Утверждается со ссылкой на работу [19], что необходимо определение таких параметров, как критическая температура инициирования самоускоряющихся реакций, нормальная скорость горения образующихся газов и максимальное давление взрыва. Проведены эксперименты с батареями 5 типов. Показатели взрыва определяли в реакционном сосуде объемом 12 л, рассчитанном на давление до 10 МПа. Батарея заряжалась до уровня SOC = 100% и помещалась в реакционный сосуд. С помощью внешнего

нагрева инициировались самоускоряющиеся реакции в батарее. Определяли состав образующихся газов, максимальное давление взрыва, скорость нарастания давления взрыва и нормальную скорость горения. Выделяющиеся газы содержат водород (до 36%), этилен (до 15%), диоксид углерода (от 34 до 43%). Максимальное давление взрыва составило от 500 до 700 кПа, максимальная скорость нарастания давления взрыва до 41,8 МПа/с. Нормальная скорость горения не превышала 80 см/с.

Методы ликвидации пожаров и аварий литий-ионных батарей

В работе [6] отмечена необходимость раннего обнаружения аварий и пожаров ЛИБ, для чего предлагается использовать дымовые пожарные извещатели как наименее инерционные. Тушение пожаров осложняется тем обстоятельством, что самоускоряющиеся химические реакции внутри батареи не требуют присутствия кислорода. Для тушения может применяться вода, обеспечивающая охлаждение батареи. Однако продолжительность ее подачи должна быть не менее 6 мин для локализации процесса и не менее 20 мин для тушения пожара. Как отмечено выше, при описании аварии с пожаром ЛИБ в главном дата-центре Национальной службы информационных ресурсов Южной Кореи, каждую батарею поштучно охлаждали в емкостях с водой. Компоненты электролита ЛИБ содержат соединения фтора, которые при реакции с водой могут выделять фтористый водород, что необходимо принимать во внимание при тушении пожаров ЛИБ. Показано, что может быть эффективной тонкораспыленная вода со смачивателем. Тонкораспыленная вода, а также огнетушащие газы и порошки могут тушить открытое пламя, однако в силу продолжающихся при этом химических реакций не предотвращаются повторные воспламенения.

В работе [19] показано, что гептафторпропан C_3F_7H может успешно подавлять горение единичной или нескольких ячеек батареи за 6–25 с, но при этом не исключаются повторные воспламенения. Методом цилиндра определены минимальные огнетушащие концентрации азота, диоксида углерода и гептафторпропана по отношению к диффузионному горению образующихся при аварии газов. Эти концентрации составляют 35–42% (об.) для азота, 25–39% (об.) для диоксида углерода и около 9% (об.) для гептафторпропана в зависимости от типа батареи. Найдено, что гептафторпропан при своих малых концентрациях промотирует горение, увеличивая яркость и размеры пламени, однако при более высоких содержаниях этого агента происходит гашение пламени.

В работе [16] выполнены эксперименты по тушению пожаров ЛИБ с помощью агента Halon 1211 (CF_2ClBr). Изучалась батарея из 8 ячеек, полностью

заряженных (SOC = 100 %). Горение батареи инициировалось с помощью пламени этанола. В ряде опытов после тушения пламени наблюдались повторные воспламенения, в результате чего требовалась подача дополнительных количеств огнетушащего газа для гашения пламени.

В работе [20] рассмотрены результаты исследований по поиску агентов для тушения пожаров ЛИБ. Отмечены случаи применения на практике различных огнетушащих веществ для ликвидации пожаров ЛИБ (порошки, хладоны, вода), использование которых зачастую приводило к повторным воспламенениям. Сформулированы требования к огнетушащим агентам, предназначенным для тушения пожаров ЛИБ:

- высокая теплоемкость с точки зрения охлаждения батареи;
- низкая электропроводность;
- низкая вязкость с точки зрения проникновения огнетушащего вещества в поры горячей батареи;
- экологичность и доступность.

Рассмотрены различные огнетушащие вещества с точки зрения их применения для тушения ЛИБ. Среди огнетушащих газовых средств представлены как фторированные (HFC-227ea — C_3F_7H , Novoc 1230 — $CF_3CF_2C(O)CF(CH_3)_2$), так и бромированные (Halon 1211 — CF_3Br , Halon 1211 — CF_2ClBr , Halon 2402 — $C_2F_4Br_2$) агенты, а также диоксид углерода. Halon 1211 используется в авиации, однако при его применении возможны повторные воспламенения. Кроме того, этот газ опасен с точки зрения воздействия на озоновый слой атмосферы. Такие газы, как CO_2 , HFC-227ea и NOVEC 1230, имеют низкий потенциал разрушения озонового слоя, низкую токсичность и химическую стабильность. Среди них CO_2 в силу своей низкой теплоемкости и высокой вероятности реализации повторных воспламенений не подходит для тушения пожаров ЛИБ. HFC-227ea при своем применении также может давать повторные воспламенения, кроме того, при тушении образуются большие количества HF. NOVEC 1230 при комнатной температуре является жидкостью (его температура кипения 49 °C) и может давать охлаждающий эффект, хотя и относительно небольшой из-за его низкой температуры кипения. Однако при содержании паров этого агента 2 % (об.) происходит промотирование горения. Кроме того, при его применении образуются токсичные продукты, а также возможно повторное воспламенение. Поэтому предлагается использовать смесь NOVEC 1230 с водой. Огнетушащие порошки могут быть эффективны для тушения пожара одной ячейки, но являются неэффективными для тушения батареи в целом. Газоаэрозольные средства хорошо тушат открытое пламя, но при их использовании вероятны повторные воспламенения.

Сделан вывод о наибольшей пригодности воды для тушения пожаров ЛИБ, однако необходимо учесть, что для ее применения необходимы высокие интенсивности и времена подачи. Для тонкораспыленной воды критическая интенсивность составляет 2 л/(м²·мин), ее эффективность может быть повышена за счет применения добавок смачивателей или пенообразователей (например, AFFF). Следует также учитывать возможность повторных воспламенений.

Выводы

На основании проведенного анализа могут быть сделаны следующие выводы.

1. Представлен анализ наиболее крупных из имевших место в эксплуатации литий-ионных батарей аварий с пожарами и взрывами, на основе которого выявлены закономерности их возникновения и развития. Выявлена важность таких параметров батареи, как ее геометрия, материалы электродов и электролита, условия ее эксплуатации для возникновения и развития аварии. Отмечено, что аварийные химические процессы в батарее могут протекать без доступа кислорода воздуха, что существенно затрудняет их локализацию и ликвидацию.

2. В случае нештатных условий эксплуатации литий-ионных батарей (перегрев, излишний заряд, короткое замыкание, разрушающее механическое воздействие) может происходить неконтролируемый самоускоряющийся нагрев батареи с образованием большого количества горючих газов (водород, метан, оксид углерода, этилен и др.). Зажигание образующейся газовой смеси в объеме помещения приводит к взрыву с разрушением строительных конструкций.

3. Проанализированы вопросы предотвращения и ликвидации аварий литий-ионных батарей. Отмечено, что последствия таких аварий во многом определяются уровнем заряда батареи к моменту возникновения инициирующего события. Выявлена необходимость устройства высокопроизводительной аварийной вентиляции (кратность до 50) в помещениях, где размещаются батареи, для предотвращения образования взрывоопасных смесей.

4. Для тушения пожаров литий-ионных батарей важным является не только ликвидация пламенного горения, но и предотвращение повторных воспламенений из-за того, что аварийные процессы в них могут протекать без доступа воздуха. В связи с этим наиболее подходящим средством является вода, которая в силу своей высокой теплоемкости может эффективно снижать температуру батареи с соответствующим прекращением указанных процессов. Газовые составы не являются эффективными, так как они не дают необходимого охлаждающего эффекта, и при их применении вероятны повторные

воспламенения. Это же относится к порошковым и газоаэрозольным средствам пожаротушения.

5. В силу отмеченных выше закономерностей протекания аварий литий-ионных батарей пред-

ставляется необходимой разработка соответствующих руководящих документов, регламентирующих действия оперативных пожарных подразделений по ликвидации таких аварий.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Емельянов Р.А., Казаков А.В., Бухтояров Д.В., Хатунцева С.Ю. Развитие нормативной базы в области пожаротушения литий-ионных аккумуляторов // Пожарная безопасность/Fire Safety. 2024. № 1 (114). С. 97–101. DOI: 10.37657/vniipr.pb.2024.114.1.011. EDN FXBOWE.
2. Харламенков А.С. Пожарная опасность применения литий-ионных аккумуляторов в России // Пожаро-взрывобезопасность/Fire and explosion safety. 2022. № 31 (3). С.96–102. EDN DHUDNE.
3. Орлов О.И., Комельков В.А., Сорокин Д.В. Пожарная опасность литий-ионных аккумуляторов // Современные проблемы гражданской защиты. 2023. № 4 (49). С. 177–188. EDN DGRGQQ.
4. Терентьев Д.И., Тикина И.В., Курочкин А.Р., Сатюков Р.С. Предварительное исследование пожаро-опасных свойств литий-ионных аккумуляторов // Техносферная безопасность. 2024. № 3 (44). С. 25–34. EDN EOLZGH.
5. Мельник А.А., Елисеев Ю.Н., Мокряк А.В., Иванов Д.В. Обзор огнетушащих средств при тушении литий-ионных батарей // Сибирский пожарно-спасательный вестник. 2021. № 2 (21). С. 33–35. DOI: 10.34987/vestnik.sibpsa.2021.30.61.006. EDN BHAFXJ.
6. Wang Q., Mao B., Sun J., Stoliarov S.I. A review of lithium ion battery failure mechanisms and fire prevention strategies // Progress in Energy and Combustion Science. 2019. No. 73. Pp. 95–131. DOI: 10.1016/j.peccs.2019.03.002. EDN DRCHAH.
7. Willstrand O., Hynynen J., Karlsson A., Brandell D. Gas release from lithium ion batteries and mitigation of potential consequences : Proceedings of the 15th International Symposium on Hazards, Prevention and Mitigation of Industrial Explosions (ISHPMIE-2024). Naples, Italy, 2024. Pp. 137–148. DOI: 10.5281/zenodo.12621001
8. Daragan F.G., Spörhase S., Kianfar A., Limbacker B., Hahn A., Essmann S. Thermal runaway of lithium ion batteries in flameproof enclosures: Effect of internal surface and gas mixture : Proceedings of the 15th International Symposium on Hazards, Prevention and Mitigation of Industrial Explosions (ISHPMIE-2024). Naples, Italy, 2024. Pp. 159–169. DOI: 10.5281/zenodo.12621001
9. Dubanewicz T., DuCarme J.T. Further study of the intrinsic safety of internally shorted lithium and lithium-ion cells within methane-air // Journal of Loss Prevention in the Process Industries. 2014. No. 32. Pp. 165–173. DOI: 10.1016/j.jlp.2014.09.002
10. Sun P., Bisschop R., Niu H., Huang X. A review of battery fires in electric vehicles // Fire Technology. 2020. No. 56 (4). Pp. 1361–1410. DOI: 10.1007/s10694-020-00958-2. EDN CQOTOS.
11. Shen X., Hu Q., Zhang Q., Wang D., Yuan Sh., Jiang Ju. et al. An analysis of li-ion induced potential incidents in battery electrical energy storage system by use of computational fluid dynamics modeling and simulations: The Beijing April 2021 case study // Engineering Failure Analysis. 2023. No. 151. P. 107384. DOI: 10.1016/j.engfailanal.2023.107384. EDN RMTZRU.
12. Peschel I., Spörhase S., Kianfar A., Markus D., Essman S. Reproduction of the pressure load due to the thermal runaway of NMC cell in a flameproof enclosure by gas explosions : Proceedings of the 15th International Symposium on Hazards, Prevention and Mitigation of Industrial Explosions (ISHPMIE-2024). Naples, Italy. Pp. 262–271. DOI: 10.5281/zenodo.12621001
13. Li W., Rao Sh., Xiao Ya., Gao Zh., Wang H., Quyang M. Fire boundaries of lithium-ion cell eruption gases caused by thermal runaway // ISience. 2021. No. 24 (5). P. 102401. DOI: 10.1016/j.isei.2021.102401. EDN FDJTGH.
14. Baird A.R., Archibald E.J., Marr K.C., Ezekoye O.A. Explosion hazards from lithium-ion battery vent gas // Journal of Power Sources. 2020. No. 446. P. 227257. DOI: 10.1016/j.jpowsour.2019.227257. EDN VRDCIE.
15. Ping P., Wang Q., Huang P., Li K., Sun J., Kong D. et al. Study of the fire behavior of high-energy lithium-ion batteries with full-scale burning test // Journal of Power Sources. 2015. No. 285. Pp. 80–89. DOI: 10.1016/j.jpowsour.2015.03.035
16. Summer S.M. Flammability assessment of lithium-ion and lithium-ion polymer battery cells designed for aircraft power usage // DOT/FAA/AR-095/55. Air Traffic Organization NextGen and Operations Planning Office of Research and Technology Development. Washington. DC 20591. 2010. P. 22. URL: <https://www.fire.tc.faa.gov/pdf/09-55.pdf>
17. Almodavar C.A., Boeck L.R., Bouwens C.R.L. Effects of heating rate on thermal runaway of LFP lithium-ion batteries: Vent gas quantification and composition analysis : Proceedings of the 15th International Symposium

- on Hazards, Prevention and Mitigation of Industrial Explosions (ISHPMIE-2024). Naples, Italy. Pp. 149–158. DOI: 10.5281/zenodo.12621001
18. Wang Q., Shao G., Duan Q., Chen M., Li Y., Wu K. et al. The efficiency of heptafluoropropane fire extinguishing agent on suppression the lithium titanate battery fire // *Fire Technology*. 2016. No. 52 (2). Pp. 387–396. DOI: 10.1007/s10694-015-0531-9. EDN FEYEGZ.
 19. Wang H., Xu H., Zhang Z., Wang Q., Jin Ch., Wu Ch. et al. Fire and explosion characteristics of vent gas from lithium-ion batteries after thermal runaway : a comparative study // *eTransportation*. 2022. No. 13. P. 1001990. DOI: 10.1016/etran.2022.100190. EDN JVXRYN.
 20. Yuan Sh., Chang Ch., Yan Sh., Zhou P., Qian X., Yuan M. et al. A review of fire extinguishing agent on suppression lithium-ion batteries fires // *Journal of Energy Chemistry*. 2021. No. 62. Pp. 262–280. DOI: 10.1016/j.jechem.2021.03.031

REFERENCES

1. Emelyanov R.A., Kazakov A.V., Bukhtoyarov D.V., Hatunzeva S.Yu. Elaboration of the regulatory framework in the field of extinguishing fires of lithium-ion batteries. *Fire Safety*. 2024; 1(114):97-101. DOI: 10.37657/vniipo.pb.2024.114.1.011. EDN FXBOWE. (rus).
2. Kharlamenkov A.S. The fire hazard of the use of lithium-ion batteries in Russia. *Fire and Explosion Safety/Pozharovzryvobezopasnost'*. 2022; 31(3):96-102. EDN DHUDNE. (rus).
3. Orlov O.I., Komelkov V.A., Sorokin D.V. Fire hazard of lithium-ion cell. *Modern Problems of Civil Protection*. 2023; 4(49):177-188. EDN DGRGQQ. (rus).
4. Terentiev D.I., Tikina I.V., Kurochkin A.R., Satukov R.S. Preliminary investigation of the fire-hazardous properties of lithium-ion batteries. *Technosphere Safety*. 2024; 3(44):25-34. EDN EOLZGH. (rus).
5. Melnik A.A., Eliseev Yu.N., Mokryak A.V., Ivanov D.V. A review of fire-extinguishing agent on suppressing lithium-ion batteries fire. *Siberian Fire and Rescue Bulletin*. 2021; 2(21):33-35. DOI: 10.34987/vestnik.sibpsa.2021.30.61.006. EDN BHAFXJ. (rus).
6. Wang Q., Mao B., Sun J., Stoliarov S.I. A review of lithium ion battery failure mechanisms and fire prevention strategies. *Progress in Energy and Combustion Science*. 2019; 73:95-131. DOI: 10.1016/j.pecs.2019.03.002. EDN DRCHAH.
7. Willstrand O., Hynynen J., Karlsson A., Brandell D. Gas release from lithium ion batteries and mitigation of potential consequences : *Proceedings of the 15th International Symposium on Hazards, Prevention and Mitigation of Industrial Explosions (ISHPMIE-2024)*. Naples, Italy, 2024; 137-148. DOI: 10.5281/zenodo.12621001
8. Daragan F.G., Sporhase S., Kianfar A., Limbacker B., Hahn A., Essmann S. Thermal runaway of lithium ion batteries in flameproof enclosures: Effect of internal surface and gas mixture : *Proceedings of the 15th International Symposium on Hazards, Prevention and Mitigation of Industrial Explosions (ISHPMIE-2024)*. Naples, Italy, 2024; 159-169. DOI: 10.5281/zenodo.12621001
9. Dubanewicz T., DuCarme J.T. Further study of the intrinsic safety shorted lithium and lithium-ion cells within methane-air. *Journal of Loss Prevention in the Process Industries*. 2014; 32:165-173. DOI: 10.1016/j.jlp.2014.09.002
10. Sun P., Huang X., Bisschop R., Niu H. A review of battery fires in electric vehicles. *Fire Technology*. 2020; 56:1361-1410. DOI: 10.1007/s10694-020-00958-2. EDN CQOTOS.
11. Shen X., Hu Q., Zhang Q., Wang D., Yuan Sh., Jiang Ju. et al. An analysis of li-ion induced potential incidents in battery electrical energy storage system by use of computational fluid dynamics modeling and simulations: The Beijing April 2021 case study. *Engineering Failure Analysis*. 2023; 151:107384. DOI: 10.1016/j.engfailanal.2023.,107384. EDN RMTZRU.
12. Peschel I., Sporhase S., Kianfar A., Markus D., Essman S. Reproduction of the pressure load due to the thermal runaway of NMC cell in a flameproof enclosure by gas explosions : *Proceedings of the 15th International Symposium on Hazards, Prevention and Mitigation of Industrial Explosions (ISHPMIE-2024)*. Naples, Italy, 2024; 262-271. DOI: 10.5281/zenodo.12621001
13. Li W., Rao Sh., Xiao Ya., Gao Zh., Wang H., Quyang M. Fire boundaries of lithium-ion cell eruption gases caused by thermal runaway. *IScience*. 2021; 24(5):102401. DOI: 10.1016/j.isei.2021.102401. EDN FDJTGH.
14. Baird A.R., Archibald E.J., Marr K.C., Ezekoye O.A. Explosion hazards from lithium-ion battery vent gas. *Journal of Power Sources*. 2020; 446:227257. DOI: 10.1016/j.jpowsour.2019.227257. EDN VRDCIE.
15. Ping P., Wang Q., Huang P., Li K., Sun J., Kong D. et al. Study of the fire behavior of high-energy lithium-ion batteries with full-scale burning test. *Journal of Power Sources*. 2015; 285:80-89. DOI: 10.1016/j.jpowsour.2015.03.035
16. Summer S.M. Flammability assessment of lithium-ion and lithium-ion polymer battery cells designed for aircraft power usage. DOT/FAA/AR-095/55. *Air Traffic Organization NextGen and Operations Planning Office of Research and Technology Development*. Washington. DC 20591. 2010; 22. URL: <https://www.fire.tc.faa.gov/pdf/09-55.pdf>

17. Almodavar C.A., Boeck L.R., Bouwens C.R.L. Effects of heating rate on thermal runaway of LFP lithium-ion batteries: Vent gas quantification and composition analysis : *Proceedings of the 15th International Symposium on Hazards, Prevention and Mitigation of Industrial Explosions (ISHPMIE-2024)*. Naples, Italy, 2024; 149-158. DOI: 10.5281/zenodo.12621001
18. Wang Q., Shao G., Duan Q., Chen M., Li Y., Wu K. et al. The efficiency of heptafluoropropane fire extinguishing agent on suppression the lithium titanate battery fire. *Fire Technology*. 2016; 52(2):387-396. DOI: 10.1007/s10694-015-0531-9. EDN FEYEGZ.
19. Wang H., Xu H., Zhang Z., Wang Q., Jin Ch., Wu Ch. et al. Fire and explosion characteristics of vent gas from lithium-ion batteries after thermal runaway : a comparative study. *eTransportation*. 2022; 13:1001990. DOI: 10.1016/etran.2022.100190. EDN JVXRYN.
20. Yuan Sh., Chang Ch., Yan Sh., Zhou P., Qian X., Yuan M. et al. A review of fire extinguishing agent on suppression lithium-ion batteries fires. *Journal of Energy Chemistry*. 2021; 62:262-280. DOI: 10.1016/j.jechem.2021.03.031

Поступила 25.11.2025, после доработки 25.11.2025;

принята к публикации 05.12.2025

Received November 25, 2025; Received in revised form November 25, 2025;

Accepted December 05, 2025

Информация об авторе

ШЕБЕКО Юрий Николаевич, д.т.н., профессор, главный научный сотрудник, Всероссийский ордена «Знак Почета» научно-исследовательский институт противопожарной обороны Министерства Российской Федерации по делам гражданской обороны, чрезвычайным ситуациям и ликвидации последствий стихийных бедствий, Россия, 143903, Московская обл., г. Балашиха, мкр. ВНИИПО, 12; РИНЦ ID: 47042; Scopus AuthorID: 7006511704; ORCID: 0000000319162547; e-mail: yn_shebeko1@mail.ru

Information about the author

Yury N. SHEBEKO, Dr. Sci. (Eng.), Professor, Chief Researcher, All-Russian Research Institute for Fire Protection of Ministry of Russian Federation for Civil Defense, Emergencies and Elimination of Consequences of Natural Disasters, VNIPO, 12, Balashikha, Moscow Region, 143903, Russian Federation; ID RSCI: 47042; Scopus AuthorID: 7006511704; ORCID: 0000000319162547; e-mail: yn_shebeko1@mail.ru

ПРАВИЛА ДЛЯ АВТОРОВ!

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

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

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

Редакция просит авторов при подготовке рукописи руководствоваться изложенными ниже правилами.

1. Статья и сопутствующие ей материалы должны быть направлены через электронную редакцию по адресу info@fire-smi.ru.

Статья должна быть ясно и лаконично изложена и подписана всеми авторами (скан страницы с подписями). Основной текст статьи должен содержать в себе четкие, логически взаимосвязанные разделы. Все разделы должны начинаться приведенными ниже заголовками, выделенными полужирным начертанием. Для научной статьи традиционными являются следующие разделы:

- введение;
- материалы и методы (методология) — для научно-эмпирической статьи;
- теоретические основы (теория и расчеты) — для научно-теоретической статьи;
- результаты и их обсуждение;
- заключение (выводы).

Редакция допускает и иную структуру, обусловленную спецификой конкретной статьи (аналитической (обзорной), дискуссионной, рекламной) при условии четкого выделения разделов:

- введение;
- основная (аналитическая) часть;
- заключение (выводы).

Подробную информацию о содержании каждого из обозначенных выше разделов см. на сайте издательства www.fire-smi.ru.

Материал статьи должен излагаться в следующем порядке.

2.1. Номер УДК (универсальная десятичная классификация).

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

2.3. Информация об авторах.

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

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

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

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

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

2.3.3. ORCID, Researcher ID, Scopus Author ID.

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

Сокращения и условные обозначения физических величин в тексте статьи должны соответствовать действующим международным стандартам. Формулы и буквенные обозначения должны быть четкими и ясными. Все буквенные обозначения, входящие в формулы, должны быть расшифрованы с указанием единиц измерения. Размерность всех характеристик должна соответствовать системе СИ.

Все иллюстрации в электронной версии прилагаются отдельно. Файлы растровых изображений должны предоставляться с разрешением не менее 300 dpi, размером не менее 1200x1200 px, в файлах формата .jpg, .tiff. Графики, чертежи и иллюстрации, созданные с помощью программ векторной графики (CorelDraw, Excel, Adobe Illustrator и проч.), следует экспортировать в PDF-файл из этой программы (предпочтительно), либо предоставлять исходник в формате той программы, в которой они созданы. Ссылки на все рисунки в тексте обязательны.

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

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

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

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

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

В описании источников необходимо указывать всех авторов.

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

При составлении References необходимо следовать схеме:

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

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

3. Статьи, присланные не в полном объеме, на рассмотрение не принимаются.

4. В случае получения замечаний в ходе внутреннего рецензирования статьи авторы должны предоставить доработанный вариант текста в срок не более одного месяца с обязательным выделением цветом внесенных изменений, а также отдельно подготовить конкретные ответы-комментарии на все вопросы и замечания рецензента.

Несвоевременный, а также неадекватный ответ на замечания рецензентов и научных редакторов приводит к задержке публикации до исправления указанных недостатков. При игнорировании замечаний рецензентов и научных редакторов рукопись снимается с дальнейшего рассмотрения.

5. Непринятые к публикации статьи автору не возвращаются. Просьба редакции о переработке материала не означает, что он принят к печати. Предпечатная подготовка статей оплачивается за счет средств подписчиков и третьих лиц, заинтересованных в публикации.

Редакция оставляет за собой право считать, что авторы, представившие рукопись для публикации в журнале «Пожаровзрывобезопасность/Fire and Explosion Safety», согласны с условиями публикации или отклонения рукописи, а также с правилами ее оформления!