

5-2025

FIRE SAFETY ПОЖАРОВЗРЫВО-

БЕЗОПАСНОСТЬ

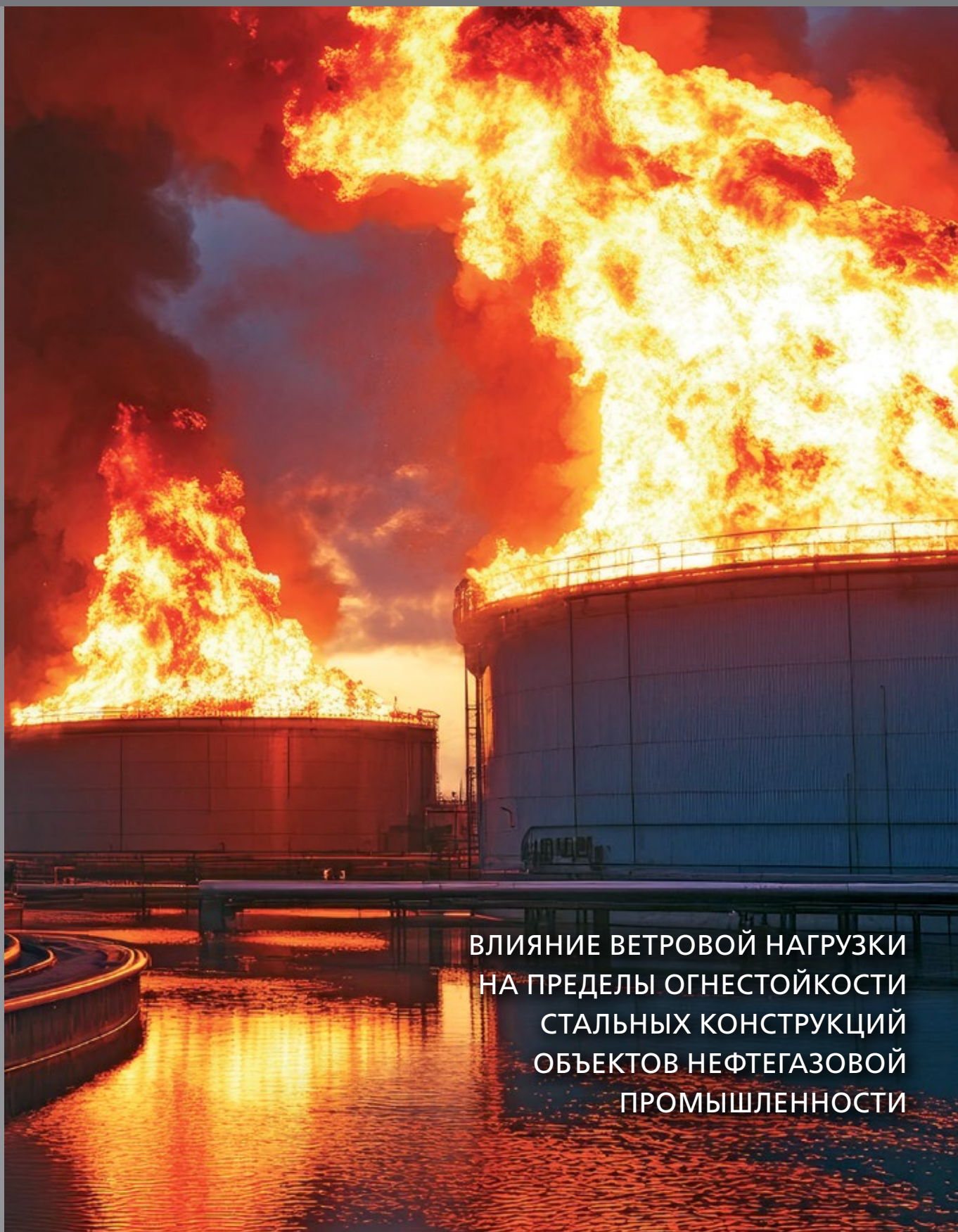


НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКИЙ ЖУРНАЛ

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

КОМПЛЕКСНАЯ БЕЗОПАСНОСТЬ

пожарная • промышленная • производственная • экологическая



ВЛИЯНИЕ ВЕТРОВОЙ НАГРУЗКИ
НА ПРЕДЕЛЫ ОГНЕСТОЙКОСТИ
СТАЛЬНЫХ КОНСТРУКЦИЙ
ОБЪЕКТОВ НЕФТЕГАЗОВОЙ
ПРОМЫШЛЕННОСТИ

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 30.10.2025.

Выход в свет 31.10.2025.

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, Юниверсити-Парк, Пенсильвания, США)

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

СОДЕРЖАНИЕ

CONTENTS

БЕЗОПАСНОСТЬ ЗДАНИЙ, СООРУЖЕНИЙ, ОБЪЕКТОВ

SAFETY OF BUILDINGS, STRUCTURES, OBJECTS

М.В. ГРАВИТ, Э.З. МАМЕДОВ, М.Д. АНТОНОВ
Влияние ветровой нагрузки на пределы огнестойкости
стальных конструкций объектов нефтегазовой
промышленности

5

M.V. GRAVIT, E.Z. MAMEDOV, M.D. ANTONOV
Influence of wind load on fire resistance
limits of steel structures of oil and gas
industry facilities

А.Г. ФИРСОВ, М.В. ЗАГУМЕННОВА,
О.В. НАДТОЧИЙ, Е.Н. МАЛЁМИНА
Пожарная опасность тепличных комплексов
и возможные риски последствий пожаров

16

A.G. FIRSOV, M.V. ZAGUMENNOVA,
O.V. NADTOCHIY, E.N. MALEMINA
Fire hazard of greenhouse complexes and possible risks
of fire consequences

ПРОЦЕССЫ ГОРЕНИЯ, ДЕТОНАЦИИ И ВЗРЫВА

COMBUSTION, DETONATION AND EXPLOSION PROCESSES

А.А. РУДЕНКО
Аналитическая оценка взрывного воздействия
на объекты и методика планирования
аварийно-восстановительных работ

27

A.A. RUDENKO
Analytical assessment of explosive impact on facilities
and methodology for planning emergency recovery
operations

СРЕДСТВА И СПОСОБЫ ТУШЕНИЯ ПОЖАРОВ

MEANS AND WAYS OF FIRE EXTINGUISHING

Д.М. ЯКУНОВ, А.А. СЕРЦОВА,
С.В. КРАСИЛЬНИКОВ, А.Ф. КОЛБАСОВ, О.В. ДВОЕНКО
Экспериментальная оценка эффективности функциональных
материалов, содержащих микрокапсулированный перфтор
(2-метил-3-пентанон), для обеспечения пожарной
безопасности литий-ионных аккумуляторных батарей
транспортных средств

47

D.M. YAKUNOV, A.A. SERTSOVA, S.V. KRASILNIKOV,
A.F. KOLBASOV, O.V. DVOENKO
Experimental evaluation of the efficiency
of functional materials containing microencapsulated
perfluoro (2-methyl-3-pentanone) to ensure
fire safety of lithium-ion batteries
of electrical vehicle

А.Б. САЕНКОВА
Экспериментальные исследования способа подачи
газопорошкового огнетушащего вещества с помощью
щелевого насадка при тушении пролива горючей жидкости

63

A.B. SAENKOVA
Experimental study of gas-powder fire extinguishing
agent application via a slotted nozzle for pool
fire suppression

БЕЗОПАСНОСТЬ ВЕЩЕСТВ И МАТЕРИАЛОВ

SAFETY OF SUBSTANCES AND MATERIALS

Ю.Н. ШЕБЕКО
Пожарная безопасность применения аммиака как
безуглеродного топлива для автомобилей и судов

71

Yu.N. SHEBEKO
Fire safety of ammonia as a carbon-free
fuel for cars and ships

ЭКОНОМИКА И УПРАВЛЕНИЕ ПОЖАРНОЙ И КОМПЛЕКСНОЙ БЕЗОПАСНОСТЬЮ

ECONOMICS AND FIRE AND COMPLEX SAFETY CONTROLE

Г.Н. ЛАХВИЦКИЙ
Анализ применимости моделей управления
системой профилактики пожаров

79

G.N. LAKHVITSKY
Analysis of the applicability of fire prevention
system management models

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.



Пожарная опасность тепличных комплексов и возможные риски последствий пожаров



▲ Стр. 16

◀ Стр. 27

Аналитическая оценка взрывного воздействия на объекты и методика планирования аварийно-восстановительных работ



Экспериментальная оценка эффективности материалов, содержащих микрокапсулированный перфтор, для обеспечения пожарной безопасности литий-ионных аккумуляторных батарей



▲ Стр. 47

◀ Стр.63

Экспериментальные исследования способа подачи газопорошкового огнетушащего вещества с помощью щелевого насадка

Стр. 71 ▶



Пожарная безопасность применения аммиака как безуглеродного топлива для автомобилей и судов

КОМПЛЕКСНАЯ БЕЗОПАСНОСТЬ

ПОЖАРНАЯ • ПРОМЫШЛЕННАЯ • ПРОИЗВОДСТВЕННАЯ • ЭКОЛОГИЧЕСКАЯ

No. **5** VOL. 34
2025

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

SCIENTIFIC AND TECHNICAL JOURNAL

EXPLOSION



**FIRE AND
SAFETY**

ПОЖАРОВЗРЫВ БЕЗОПАСНОСТЬ

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 30.10.2025.

Date of publication 31.10.2025.

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)

Влияние ветровой нагрузки на пределы огнестойкости стальных конструкций объектов нефтегазовой промышленности

Марина Викторовна Гравит¹✉, Эльдар Захирович Мамедов²,
Максим Дмитриевич Антонов³

¹ Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого, г. Санкт-Петербург, Россия

² ООО «Запсибгазпром-Газификация», г. Тюмень, Россия

³ ООО «Метропроект», г. Санкт-Петербург, Россия

АННОТАЦИЯ

Введение. Аварии на объектах нефтегазового комплекса происходят ежегодно. Современная российская нормативная база предписывает проведение испытаний для определения огнестойкости конструкций при стандартном температурном режиме и не учитывает специфику технологических процессов производственного объекта, а также его расположение и климатические параметры окружающей среды.

Цели и задачи. Определить величину ветровой нагрузки для каждого из объектов. На основе разработанных полевых моделей получить расчетные модели пожара, учитывающие действие ветра. Оценить влияние ветра на пределы огнестойкости стальных строительных конструкций объектов нефтегазовой промышленности.

Методы. Расчет произведен с применением FDS в ПК Pyrosim на основе информационных моделей объектов, разработанных в ПК Revit. Для определения ветрового воздействия на объекты была применена теория подобия Монина – Обухова.

Результаты. По итогам моделирования получены области распространения ОФП для каждого из объектов. Показано, что прирост радиуса зоны влияния пожара составляет от 4,5 до 8,6 м.

Выводы. Результаты расчета с учетом ветровой нагрузки демонстрируют значительное расширение зоны влияния пожара. Можно сделать вывод, что игнорирование ветровой нагрузки при определении пределов огнестойкости конструкций или разработке проекта огнезащиты недопустимо, поскольку ветер значительно увеличивает площадь зоны влияния пожара, а следовательно, и объем конструкций, подлежащих огнезащите.

Ключевые слова: сооружения нефтегазового комплекса; пожарная безопасность; опасные факторы пожара; моделирование

Для цитирования: Гравит М.В., Мамедов Э.З., Антонов М.Д. Влияние ветровой нагрузки на пределы огнестойкости стальных конструкций объектов нефтегазовой промышленности // Пожаровзрывобезопасность/ Fire and Explosion Safety. 2025. Т. 34. № 5. С. 5–15. DOI: 10.22227/0869-7493.2025.34.05.5-15

✉ Гравит Марина Викторовна, e-mail: marina.gravit@mail.ru

Influence of wind load on fire resistance limits of steel structures of oil and gas industry facilities

Marina V. Gravit¹✉, Eldar Z. Mamedov², Maksim D. Antonov³

¹ Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University, Saint Petersburg, Russian Federation

² “Zapsibgazprom-Gazifikatsiya” LLC, Tyumen region, Russian Federation

³ “Metroproject” LLC, Saint Petersburg, Russian Federation

ABSTRACT

Introduction. Accidents at oil and gas facilities occur every year. Current Russian regulations require testing to determine the fire resistance of structures under standard temperature-time curve and do not take into account the specific features of the production facility’s technological processes, its location, or the climatic parameters of the surrounding environment.

Aims and Purposes. Assess the impact of wind on the fire resistance limits of steel structures in oil and gas industry facilities. Determine the wind load for each facility. Based on previously created field models, develop fire calculation models that take wind effects into account.

Methods. The calculation was performed using FDS in Pyrosim software based on information models of objects developed in Revit software. Monin – Obukhov similarity theory was used to determine the wind impact on objects.

Results. Based on the simulation results, the areas of spread of the fire front were determined for each of the objects. It was shown that the increase in the radius of the fire's zone of influence ranges from 4.5 to 8.6 m.

Conclusions. The results of the calculation, taking into account wind load, demonstrate a significant expansion of the fire's area of influence. It can be concluded that ignoring wind load when determining the fire resistance limits of structures or developing a fire protection design is unacceptable, since wind significantly increases the area of the fire's impact zone and, consequently, the volume of structures requiring fire protection.

Keywords: oil and gas complexes; fire safety; fire hazards; modelling

For citation: Gravit M.V., Mamedov E.Z., Antonov M.D. Influence of wind load on fire resistance limits of steel structures of oil and gas industry facilities. *Pozharovzrybobezopasnost/Fire and Explosion Safety*. 2025; 34(5):5-15. DOI: 10.22227/0869-7493.2025.34.05.5-15 (rus).

✉ Marina Victorovna Gravit, e-mail: marina.gravit@mail.ru

Введение

Несмотря на высокий уровень автоматизации современной нефтедобывающей отрасли, статистика¹ ежегодно отмечает взрывы и пожары, происходящие на производственных объектах нефтегазодобывающей промышленности. В качестве основных причин данных аварий можно выделить износ производственного оборудования и нарушение технологического производства.

Такие пожары отличаются достижением высоких температур через небольшой промежуток времени после начала [1] и необходимостью использования определенных средств и методов пожаротушения [2]. Поэтому они могут оказывать катастрофическое температурное воздействие на несущие конструкции производственных объектов [3].

Нормативные документы, регламентирующие огнестойкость строительных конструкций, в зависимости от страны, в которой они действуют, предполагают различные температурные режимы при проведении испытаний [4–6]. Так, в российской нормативной базе² в процессе испытания конструкций на огнестойкость должен быть создан стандартный температурный режим (1):

$$T - T_0 = 345 \lg(8t + 1), \quad (1)$$

где T — температура в печи, соответствующая времени, °C;

T_0 — температура в печи до начала теплового воздействия, °C;

t — время, исчисляемое от начала испытания, мин.

В то же время, например, в США испытания проводятся при углеводородном режиме пожара, который более соответствует пожару пролива и факельному

горению на объекте нефтегазовой промышленности, чем стандартный температурный режим. Кроме этого, в российской нормативной документации не учитывается влияние специфики производственного объекта, и вследствие этого температурного режима, и сценария протекания вероятного пожара (например, струйное горение или «Jet Fire» [7]). В работе [8] авторы утверждают, что введение в отечественную нормативную базу положений зарубежных регламентирующих документов позволит подойти к вопросу определения огнестойкости строительных конструкций нефтегазового комплекса более гибко.

Одним из основных методов оценки пределов огнестойкости стальных несущих конструкций, в том числе объектов нефтегазовой отрасли (этажерок, эстакад, резервуаров и т.п.), применяемых на начальных этапах исследования и не требующих проведения натурных огневых испытаний, является математическое моделирование в различных программных комплексах.

В исследовании [9] авторы рассматривают поведение двутавровой балки под статической нагрузкой различной величины при воздействии температурного режима пожара. Для расчета авторы применяют программный комплекс ANSYS и нейросети. Результаты показали высокое качество полученной модели.

Статья [10] посвящена исследованию поведения стальных балок в условиях реального пожара. В своей работе авторы используют FDS (Fire Dynamics Simulator). Утверждается, что погрешность расчета на основе полученной модели составляет менее 5 %.

В исследовании [11] авторы рассматривают поведение стальных колонн в условиях пожара. В материалах статьи приводится численная методика оценки огнестойкости заземленных стальных колонн. Такая колонна, жестко заземленная в базе и несущая вертикальную нагрузку, склонна к потере устойчивости в условиях пожара. Методика, предложенная авторами, как утверждается, позволяет описывать широкий перечень практических случаев: различное опирание колонны, эксплуатационные нагрузки, а также

¹ Годовой отчет о деятельности федеральной службы по экологическому, технологическому и атомному надзору в 2023 году // Федеральная служба по экологическому, технологическому и атомному надзору. 2024. URL: https://www.gosnadzor.ru/public/annual_reports

² ГОСТ 30247.0–94. Конструкции строительные. Методы испытаний на огнестойкость. Общие требования.

разнообразные параметры температурного воздействия. Ожидается, что методика станет весьма полезным инструментом в оценке огнестойкости несущих конструкций.

Значительное влияние на динамику распространения пожара оказывает ветер. Для объектов, не имеющих сплошного фасада (например, эстакады, этажерки, навесы), характерно значительное горизонтальное смещение зоны влияния горения, вызванное воздействием ветровой нагрузки. Исследования, посвященные анализу влияния ветровой нагрузки на динамику распространения пожара, рассматривают различные сценарии возникновения и распространения пожара. Так, например, в исследовании [12] на основе числового моделирования рассматривается влияние ветра на распространение огня по фасадной системе.

Также ветровая нагрузка оказывает значительное влияние на эффективность систем вентиляции и дымоудаления высотных зданий. В работе [13] авторы утверждают, что ветровая нагрузка оказывает значительное влияние на эффективность систем дымоудаления зданий.

Отдельная категория научных работ посвящена исследованию влияния не только ветровой нагрузки, но и рельефа местности на форму пожара и скорость его распространения. В исследовании [14] авторы утверждают, что среди различных факторов, влияющих на распространение огня, ключевое значение имеют уклон рельефа местности и скорость ветра. Аналогичная тема рассмотрена авторами статьи [15]. В работе [16] рассматривается совместное влияние процентного наклона рельефа и интенсивности пожара на идеализированное здание.

В исследованиях [17, 18] авторы анализируют влияние конфигурации источника огня и скорости ветра на мощность и динамику распространения пожара.

В работе [19] авторы изучают влияние взаимного расположения двух зданий, скорости ветра и его направления на распространение пожара.

Детальное исследование взаимодействия огня и ветра имеет большое значение для понимания причин разрушительных последствий крупных пожаров в ветреную погоду. Несмотря на большое количество научных работ, посвященных анализу огнестойкости конструкций объектов нефтегазового комплекса в целом, вопросы влияния ветра на пределы огнестойкости стальных конструкций каркасных объектов (этажерок, эстакад) освещены слабо.

Целью настоящей работы является оценка влияния ветровой нагрузки на пределы огнестойкости стальных строительных конструкций на объектах нефтегазовой промышленности. Для достижения

поставленной цели необходимо решить следующие задачи:

- проанализировать проектную документацию рассматриваемых объектов в части географического расположения сооружений, рельефа местности, а также параметров климата;
- определить величину ветровой нагрузки: изменение скорости ветра по высоте объекта;
- построить полевые модели пожара, учитывающие ветровую нагрузку;
- получить величины смещения областей влияния ОФП на рассматриваемых объектах и оценить влияние ветровой нагрузки на достижение пределов огнестойкости стальных несущих конструкций.

Материалы и методы

В исследовании рассматривались три объекта: эстакада нефтегазосборной сети (объект № 1), этажерка сжижения природного газа (объект № 2) и этажерка узла десорбции (объект № 3) (рис. 1). Расчет распространения опасных факторов пожара и пределов огнестойкости для данных объектов произведен без учета влияния ветровой нагрузки [20, 21].

Моделирование, учитывающее влияние ветровой нагрузки, производилось в ПО Pyrosim. Полевая модель пожара построена на расчетной сетке $0,2 \times 0,2 \times 0,2$ м и содержит следующие объекты: конструкции объектов; поверхность распространения пожара с заданной удельной мощностью тепловыделения; непроницаемую холодную поверхность земли; открытые границы расчетной области; датчики, фиксирующие значения температуры окружающей среды на удалении от очага пожара. Геометрия самих сооружений (конструкции: колонны, балки, перекрытия и т.д.) импортирована из ПО Revit с применением формата IFC.

Датчики, фиксирующие температуру окружающей среды, установлены в горизонтальной плоскости на расстоянии от 0 до 15 м от очага пожара с шагом 3 м.

Продолжительность расчета составила 300 с. Данное значение принято с учетом положений Методики³ как расчетное время отключения технологических трубопроводов при ручном управлении.

Для рассматриваемых сценариев смоделированы восемь дополнительных ситуаций, каждая из которых учитывает различное направление ветровой нагрузки по следующей схеме (рис. 2).

Нормативные показатели скорости и направления ветра приняты согласно СП 131.13330⁴ с учетом

³ Об утверждении методики определения расчетных величин пожарного риска на производственных объектах : Приказ МЧС России от 26 июня 2024 г. № 533.

⁴ СП 131.13330.2020. СНиП 23-01-99. Строительная климатология.

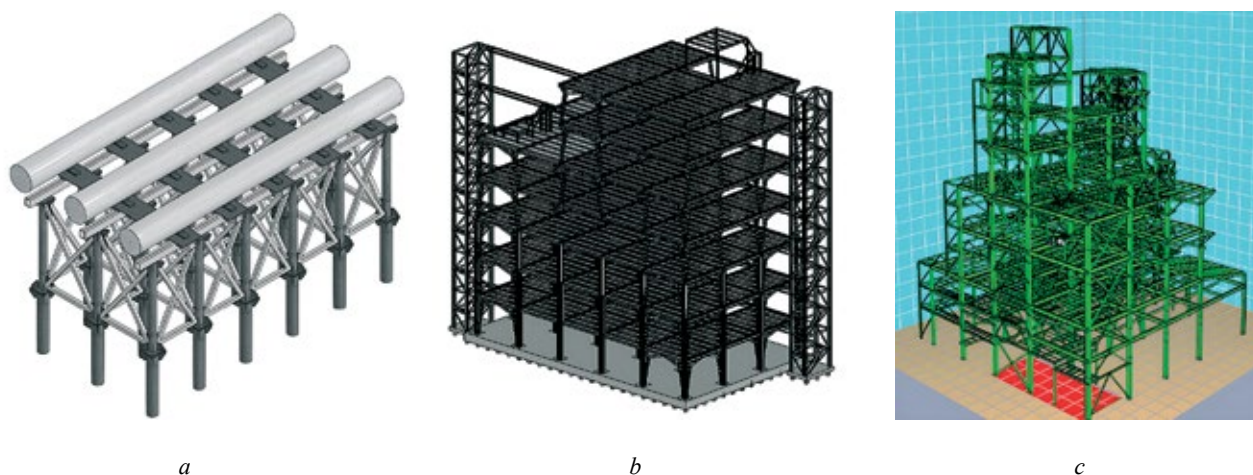


Рис. 1. Общий вид моделей: а — эстакада нефтегазосборной сети; б — этажерка сжижения природного газа; с — этажерка узла десорбции

Fig. 1. General view of models: a — oil and gas gathering rack; b — natural gas liquefaction rack; c — desorption unit rack

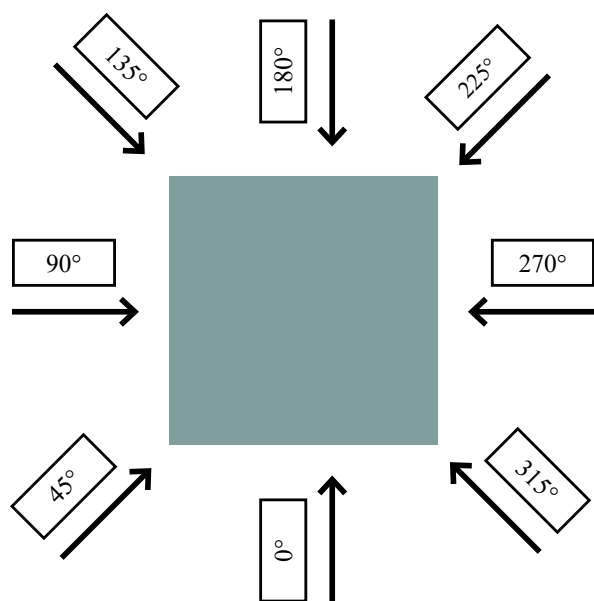


Рис. 2. Рассматриваемые направления ветра для расчета

Fig. 2. Analyzed wind directions for calculation

географического положения рассматриваемых объектов (табл. 1).

При определении параметров ветровой нагрузки для ее задания в Rygosim применялась теория подобия Монина – Обухова [22]. Данная теория рассматривается как самая простая и используется для моделирования профиля скорости ветра на высотах, относящихся к приземному слою воздуха. В соответствии с этой теорией скорость ветра v на высоте z определяется по формуле (2):

$$v(z) = \frac{u_*}{k} \cdot \ln \frac{z}{z_0}, \tag{2}$$

где u_* — скорость трения;
 k — постоянная Кармана;
 z — высота расчета;
 z_0 — параметр шероховатости, принимаемый в зависимости от ландшафта местности. Для открытого ландшафта принимаем $z_0 = 0,03$.

Таблица 1. Нормативные показатели ветровой нагрузки

Table 1. Standard wind load indicators

Номер объекта Object number	Преобладающее направление ветра за декабрь – февраль Prevailing wind direction for December – February	Максимальная из средних скоростей ветра по румбам за январь, м/с Maximum average wind velocity by compass direction for January, m/s	Средняя скорость ветра, м/с, за период со средней суточной температурой воздуха $\leq 8^\circ\text{C}$ Average wind velocity, m/s, for the period with an average daily air temperature $\leq 8^\circ\text{C}$	Преобладающее направление ветра за июнь – август Prevailing wind direction for June – August	Минимальная из средних скоростей ветра по румбам за июль, м/с Minimum average wind velocity by compass direction for July, m/s
1	ЮЗ SW	7,7	6,2	С N	4,8
2	ЮЗ, З SW, W	3,2	2,4	З W	2,3
3	ЮВ SE	4,1	3,1	С N	0,0

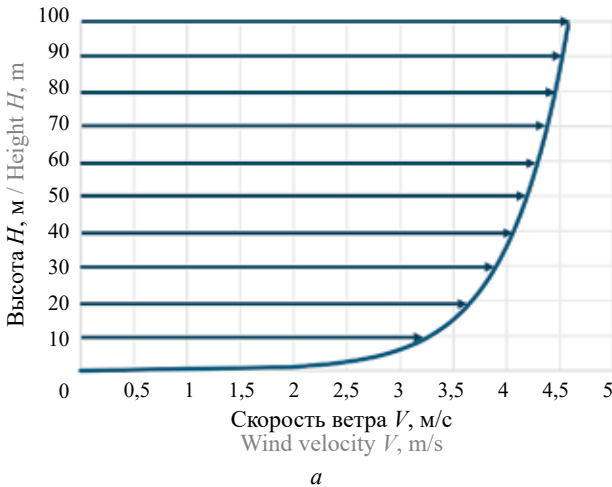
Таблица 2. Показатели скорости трения
Table 2. Friction speed indicators

Номер объекта Object number	Показатель аэродинамической шероховатости Aerodynamic roughness index	Принятая скорость ветра, м/с Accepted wind velocity, m/s	Показатель скорости трения Friction coefficient
1	0,03	7,7	0,543
2	0,03	3,2	0,226
3	0,03	4,1	0,289

В свою очередь, скорость трения u_* определяется из формулы (3):

$$u_* = \sqrt{\frac{\tau_w}{\rho}}, \quad (3)$$

где τ_w — напряжения сдвига на границе потока;
 ρ — плотность воздуха.



В то же время при наличии значений скорости ветра на определенной высоте скорость трения можно определить по формуле (4):

$$u_* = \frac{v(z) \cdot k}{\ln \frac{z}{z_0}}. \quad (4)$$

Показатели скорости трения для объектов приведены в табл. 2.

На основании полученных значений по формуле (1) можно определить, как изменяется скорость ветра с увеличением высоты (рис. 3).

Результаты и их обсуждение

В Pyrosim произведено моделирование распространения ОФП, в результате которого получены визуализации распространения ОФП на объектах, а также графики зависимости температуры окружающей среды от времени. На рис. 4 показан

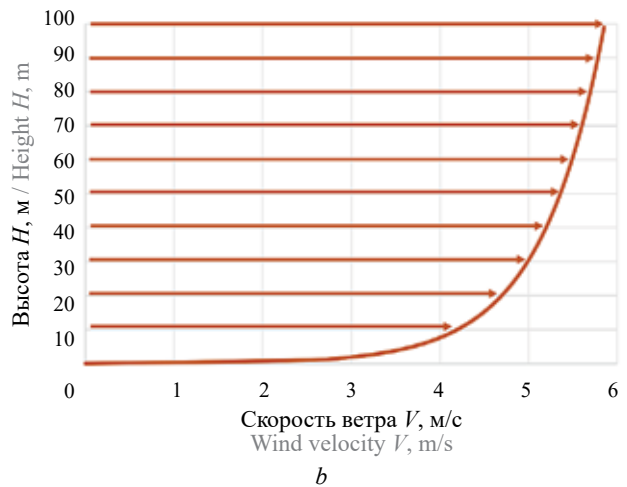


Рис. 3. Зависимость скорости ветра от высоты: *a* — для объекта № 2; *b* — для объекта № 3
Fig. 3. Wind velocity dependence on altitude: *a* — for object No. 2; *b* — for object No. 3

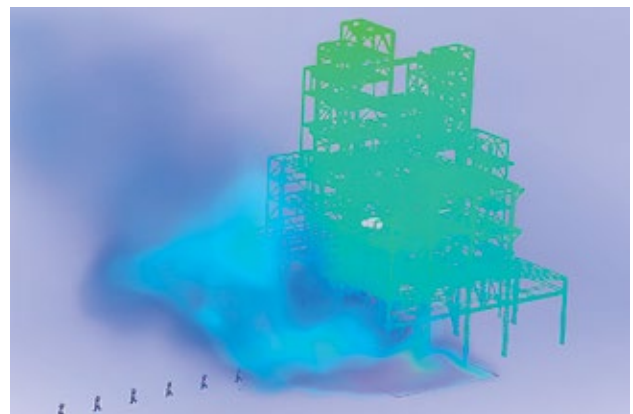
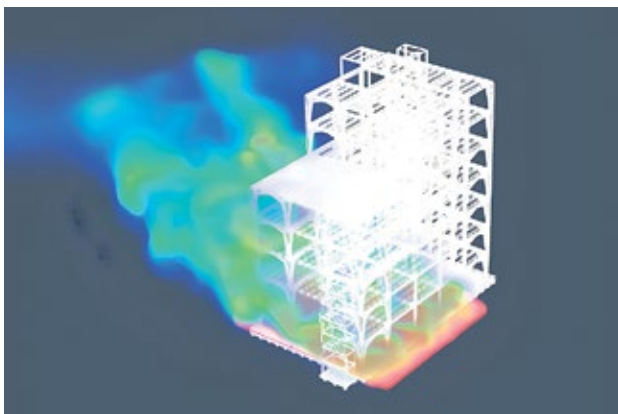


Рис. 4. Общий вид расчетных моделей и распространения ОФП с учетом влияния ветровой нагрузки: *a* — для объекта № 2; *b* — для объекта № 3
Fig. 4. General view of calculation models and the spread of hazardous fire factors, taking into account the influence of wind load: *a* — for facility No. 2; *b* — for facility No. 3

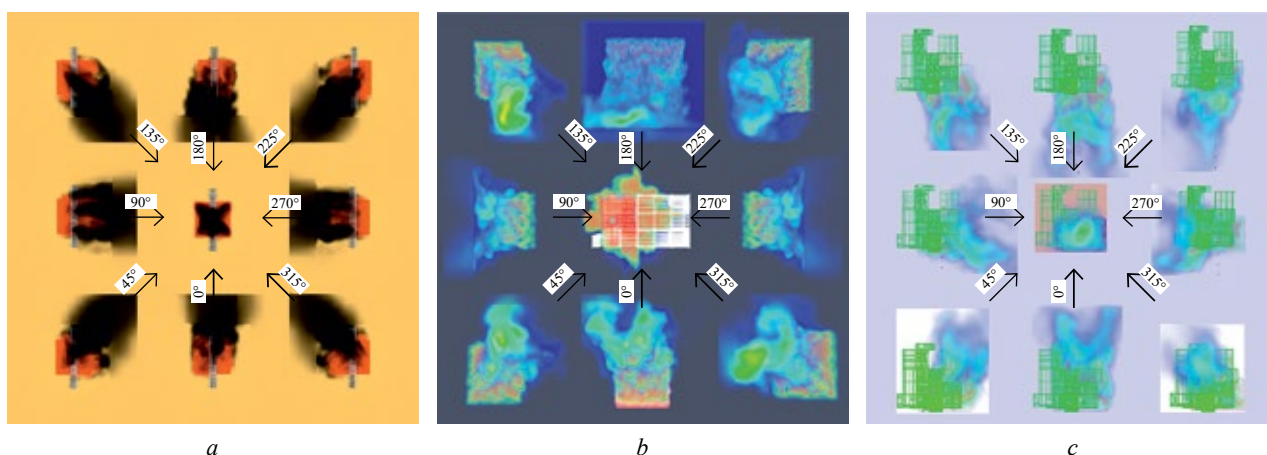


Рис. 5. Горизонтальная проекция областей распространения ОФП для: *a* — объекта № 1; *b* — объекта № 2; *c* — объекта № 3
Fig. 5. Horizontal projection of areas affected by hazardous fire factors for: *a* — facility No. 1; *b* — facility No. 2; *c* — facility No. 3

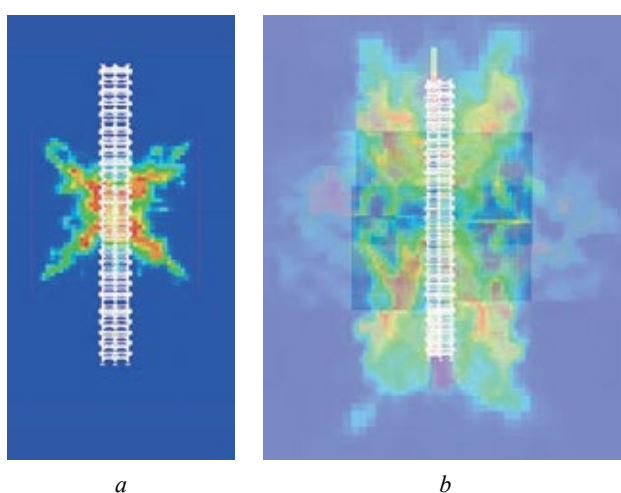
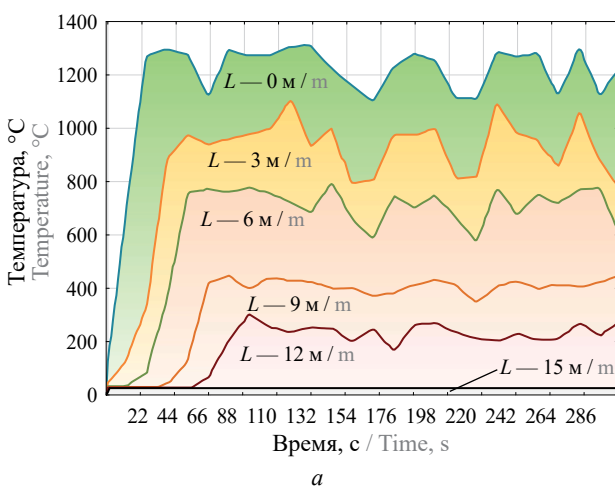


Рис. 6. Сравнение областей распространения ОФП при пожаре на объекте № 1: *a* — без учета ветровой нагрузки; *b* — с учетом ветровой нагрузки
Fig. 6. Comparison of the areas affected by hazardous fire factors during a fire at facility No. 1: *a* — without taking wind load into account; *b* — taking wind load into account

Рис. 6. Сравнение областей распространения ОФП при пожаре на объекте № 1: *a* — без учета ветровой нагрузки; *b* — с учетом ветровой нагрузки

Fig. 6. Comparison of the areas affected by hazardous fire factors during a fire at facility No. 1: *a* — without taking wind load into account; *b* — taking wind load into account



общий вид расчетных моделей (для объектов № 2 и 3) и температурных полей с учетом ветровой нагрузки.

Смещение ОФП, вызванное ветровой нагрузкой, хорошо заметно на виде сверху (рис. 5).

На рис. 6 показаны области распространения ОФП при пожаре на объекте № 1 без учета ветровой нагрузки и с ее учетом. Рис. 6, *b* получен путем наложения друг на друга областей распространения ОФП при каждом отдельно взятом рассматриваемом направлении ветра.

Датчики, установленные на расстоянии от 0 до 15 м с шагом 3 м от очага пожара, фиксировали изменения температуры окружающей среды в процессе моделирования. Показания для каждого датчика приведены на рис. 7.

На рис. 8 представлены трехмерные графики распределения температуры в горизонтальной плоскости по завершении моделирования. Горизонтальная черная линия отсекает температуру, являющуюся

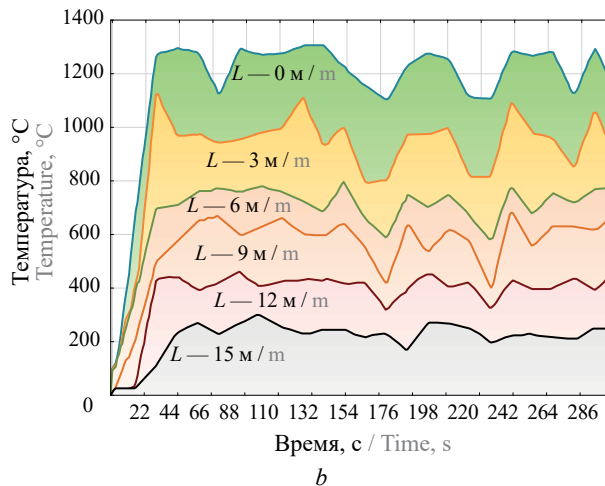


Рис. 7. Зависимость температуры окружающей среды от времени для контрольных точек объекта № 1: *a* — без учета ветровой нагрузки; *b* — с учетом ветровой нагрузки
Fig. 7. Dependence of ambient temperature on time for control points of object No. 1: *a* — without taking wind load into account; *b* — taking wind load into account

Рис. 7. Зависимость температуры окружающей среды от времени для контрольных точек объекта № 1: *a* — без учета ветровой нагрузки; *b* — с учетом ветровой нагрузки

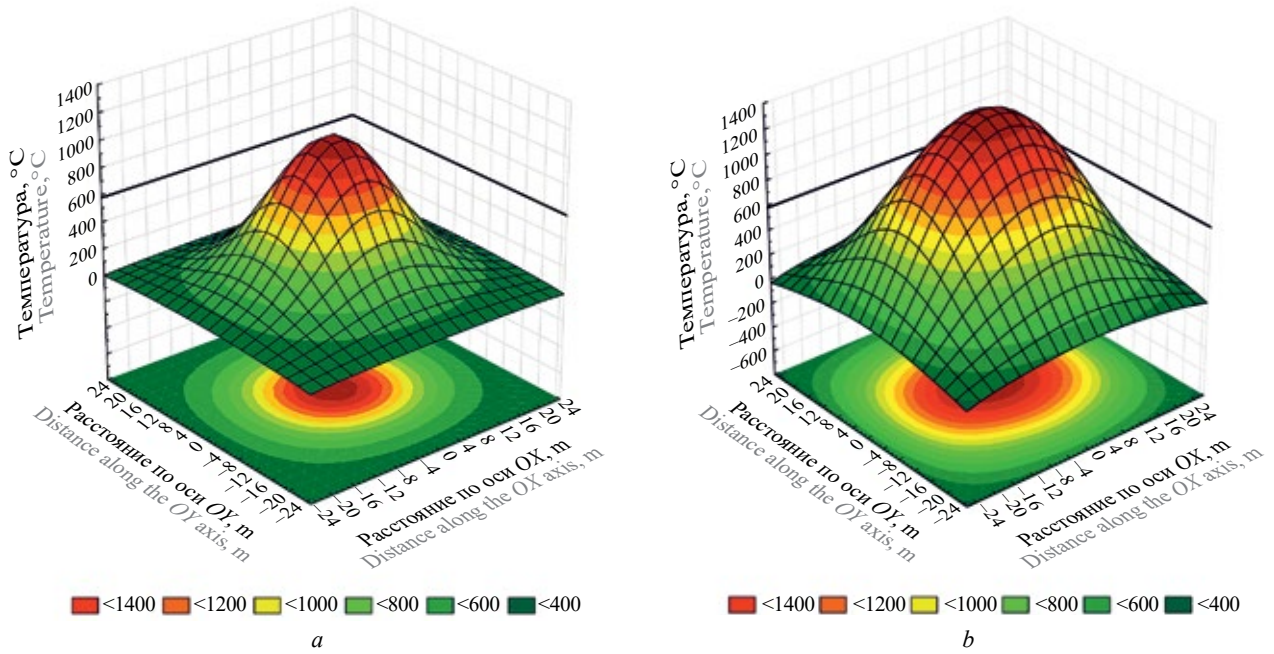


Рис. 8. Распределение температуры среды вокруг объекта № 1: *a* — без учета ветровой нагрузки; *b* — с учетом ветровой нагрузки
 Fig. 8. Distribution of the ambient temperature around object No. 1: *a* — without wind load; *b* — with wind load

Таблица 3. Влияние ветровой нагрузки на радиус зоны воздействия пожара для объектов
 Table 3. The influence of wind load on the radius of the fire impact zone for facilities

Номер объекта Object Number	Мощность пожара, МВт Fire power, MW	Принятая скорость ветра, м/с Accepted wind velocity, m/s	Радиус зоны воздействия пожара, м Radius of the fire impact zone, m	Радиус зоны воздействия пожара с учетом ветровой нагрузки, м Radius of the fire impact zone, taking into account wind load, m	Изменение зоны воздействия пожара, м Fire impact zone change, m
1	305,24	7,7	10,7	19,3	8,6
2	785,18	3,2	13,6	18,1	4,5
3	349,76	4,1	11,5	16,4	4,9

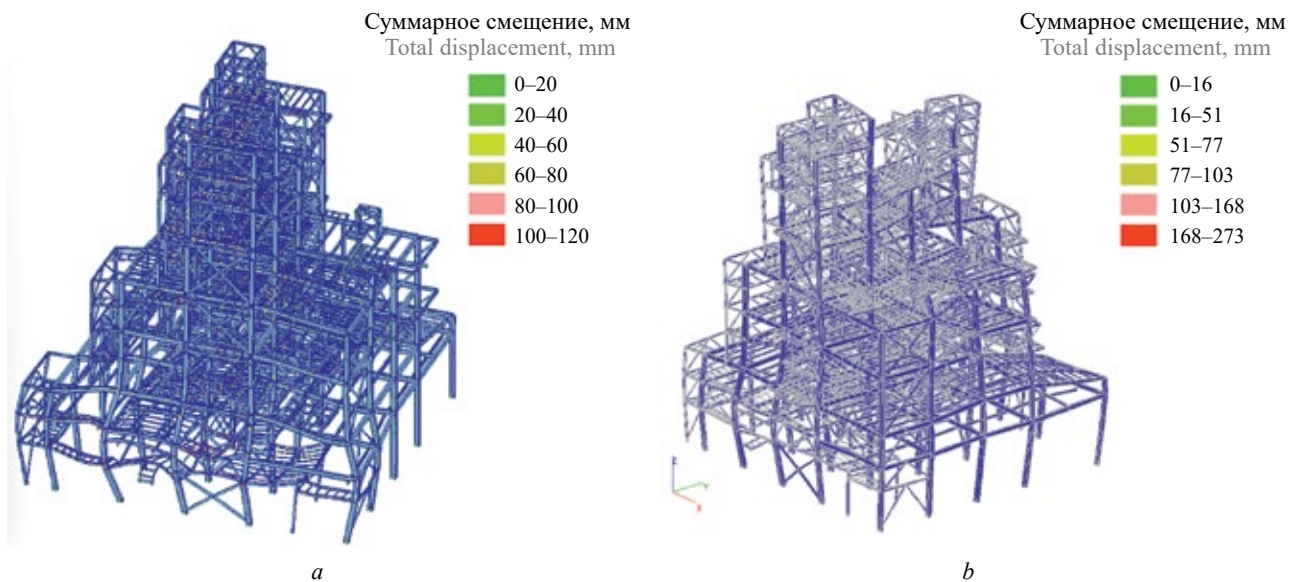


Рис. 9. Деформированная конструктивная схема объекта № 3: *a* — без учета ветровой нагрузки; *b* — с учетом ветровой нагрузки
 Fig. 9. Deformed structures of object No. 3: *a* — without taking wind load into account; *b* — taking wind load into account

критической для конструкций объекта № 1, определенную в работе [21]. Горизонтальное смещение пламени составило от 2 до 6 м.

По рис. 8 хорошо заметно влияние ветровой нагрузки на радиус зоны повышенной температуры. Величина непосредственно прироста радиуса данной зоны составила от 4,5 до 8,6 м.

Результаты моделирования для каждого из рассматриваемых объектов приведены в табл. 3.

В качестве визуализации в расчетной модели в SCAD приложена температурная нагрузка, соответствующая результатам моделирования в Pyrosim. На рис. 9, *a* показана деформированная схема объекта № 3 при пожаре пролива без учета ветровой нагрузки. Заметны деформации конструкций в зоне, прилегающей к очагу возгорания. Рис. 9, *b* демонстрирует искривление конструкций объекта № 3 с учетом ветра. Здесь наблюдаются деформации конструкций в области смещения ОФП.

Заключение

В ходе работы проанализирована проектная документация на объекты нефтегазовой промышленности. Нормативное значение ветровой

нагрузки для каждого сооружения принято согласно СП 131.13330⁴. Влияние на величину ветровой нагрузки оказывает расположение объекта: открытые территории, близость к побережьям морей и т.п. Для каждого объекта определена зависимость ветровой нагрузки от высоты сооружения с использованием теории Монино – Обухова.

Вычисленные скорости ветра учтены в полевой модели объектов в ПК Pyrosim. По завершении расчета выявлен прирост радиуса зоны влияния пожара от 4,5 до 8,6 м. Полученные результаты демонстрируют заметное смещение пламени и, следовательно, области высоких температур относительно очага пожара. При этом заметно, что максимальная температура в непосредственной близости от центра возгорания в расчете, учитывающем ветровую нагрузку, не снижается относительно моделирования без ветра. Увеличивается лишь радиус влияния пожара.

Таким образом, пренебрежение ветровой нагрузкой при определении пределов огнестойкости конструкций и проектировании огнезащиты недопустимо, поскольку ветер может значительно увеличить площадь зоны влияния пожара и, следовательно, объем металлоконструкций, подлежащих огнезащите.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Голованов В.И., Пехотиков А.В., Павлов В.В. Расчет огнестойкости конструкций из стали с повышенными показателями огнестойкости для объектов нефтегазовой промышленности // Территория Нефтегаз. 2007. № 4. С. 72–77. EDN LJMUEX.
2. Епищенко С.В., Усков А.В. Экспериментальное исследование по использованию диоксида углерода для пожаротушения в резервуарах с нефтью и нефтепродуктами // Актуальные вопросы общества, науки и образования : сб. ст. XX Междунар. науч.-практ. конф., Пенза, 20 марта 2025 года. Пенза : Наука и Просвещение (ИП Гуляев Г.Ю.), 2025. С. 60–65. EDN MTDFDV.
3. Dehkordi M.K., Behnam B., Pirbalouti R.G. Probabilistic fire risk analysis of process pipelines // Journal of Loss Prevention in the Process Industries. 2022. No. 80. P. 104907. DOI: 10.1016/j.jlp.2022.104907. EDN AMHAMR.
4. Хасанов И.Р., Гравит М.В., Косачев А.А., Пехотиков А.В., Павлов В.В. Гармонизация европейских и российских нормативных документов, устанавливающих общие требования к методам испытаний на огнестойкость строительных конструкций и применению температурных режимов, учитывающих реальные условия пожара // Пожаровзрывобезопасность/Fire and Explosion Safety. 2014. № 23 (3). С. 49–57. EDN SFOCFE.
5. Абрамов И.В., Гравит М.В., Гумерова Э.И. Повышение пределов огнестойкости судовых и строительных конструкций при углеводородном температурном режиме // Газовая промышленность. 2018. № 5 (768). С. 108–117. EDN XMYFSP.
6. Клементьев Б.А., Калач А.В., Гравит М.В. Сравнительный анализ требований России и США к огнестойкости строительных конструкций нефтеперерабатывающих и нефтехимических заводов // Пожаровзрывобезопасность/Fire and Explosion Safety. 2021. № 30 (5). С. 5–22. DOI: 10.22227/0869-7493.2021.30.05.5-22. EDN MNGMRT.
7. Kashi E., Bahoosh M. Jet fire assessment in complex environments using computational fluid dynamics // Brazilian Journal of Chemical Engineering. 2020. No. 37 (1). Pp. 203–212. DOI: 10.1007/s43153-019-00003-y. EDN GUWZFG.
8. Шебеко А.Ю. Оценка требуемых пределов огнестойкости строительных конструкций этажерок и эстакад предприятий нефтегазовой отрасли // Пожарная безопасность. 2019. № 1. С. 103–107. EDN YZZZML.
9. Džolev I., Kekez S., Rašeta A. Fire Resistance of Steel Beams with Intumescent Coating Exposed to Fire Using ANSYS and Machine Learning // Buildings. 2025. No. 15 (13). P. 2334. DOI: 10.3390/buildings15132334

10. Chen W., Qin Q., Wang X., Li J., Liang M. Chen Zh. et al. Study on the Fire Resistance of Axially Restrained H-Shaped Steel Beams Under Real Fire // *Applied Sciences (Switzerland)*. 2025. No. 15 (13). P. 7424. DOI: 10.3390/app15137424
11. Simão P.D., Rodrigues J.P.C. Direct evaluation of fire resistance for restrained steel columns in frames using consistent rigid-plastic models and energy formulations // *Engineering Structures*. 2023. No. 276. P. 115344. DOI: 10.1016/j.engstruct.2022.115344. EDN MGXULQ.
12. Tian Zh., Chen X., Suendermann B., Gamble G., Huang Z., Tang Y. Wind Effect on External Fire Spread through Openings under the Protection of Horizontal Projections or Vertical Spandrels — A Numerical Study // *Fire*. 2024. No. 7 (3). P. 66. DOI: 10.3390/fire7030066. EDN LEEHQP.
13. Буянов В.И., Чертов В.А. Учет влияния направления ветра при обеспечении незадымляемости высотных зданий во время пожара // *Проблемы обеспечения безопасности при ликвидации последствий чрезвычайных ситуаций*. 2014. № 1 (3). С. 172–174. EDN VPSURD.
14. Shojaei Mehr R., Mohammadian Bishe E., Farhanien B., Afshin H. Numerical Investigation of the Combined Effect of Terrain Slope and Wind Velocity on Fire Spread Rate in Natural Pastures // *Modelling — International Open Access Journal of Modelling in Engineering Science*. 2025. No. 6 (1). P. 15. DOI: 10.3390/modelling6010015. EDN BQERSU.
15. Javaloyes M.A., Pendas-Recondo E., Sánchez M. A General Model for Wildfire Propagation with Wind and Slope // *SIAM Journal on Applied Algebra and Geometry*. 2023. No. 7 (2). Pp. 414–439. DOI: 10.1137/22m1477866. EDN LZMZRI.
16. Ghodrat M., Edalati Nejad A., Simeoni A. Collective Effects of Fire Intensity and Sloped Terrain on Wind-Driven Surface Fire and Its Impact on a Cubic Structure // *Fire*. 2022. No. 5 (6). P. 208. DOI: 10.3390/fire5060208. EDN QBGKOP.
17. Eftekharian E., Ghodrat M., He Y., Ong R.H., Kwok K.C.S., Zhao M. Numerical Analysis of the Effect of Fire Source Configuration on Fire-Wind Enhancement // *Heat Transfer Engineering*. 2019. No. 42 (1). Pp. 41–60. DOI: 10.1080/01457632.2019.1685249.
18. Eftekharian E., Ghodrat M., He Y., Zhao M., Ong R.H., Kwok K.C.S. Numerical analysis of wind velocity effects on fire-wind enhancement // *International Journal of Heat and Fluid Flow*. 2019. No. 80. P. 108471. DOI: 10.1016/j.ijheatfluidflow.2019.108471. EDN AKQEAE.
19. Beshir M.R., Mohamed M., Kouritem S.A., Lemmert C.K., Centeno F.R., Rush D. Investigating Numerically the Effect of Wind on Fire Spread Between Two Informal Settlements Dwellings // *Fire Technology*. 2023. No. 61. Pp. 1233–1268. DOI: 10.1007/s10694-023-01374-y. EDN SALEGS.
20. Гравит М.В., Мамедов Э.З. Моделирование огнестойкости стальных конструкций эстакад нефтегазовых месторождений при кустовом расположении скважин // *Пожаровзрывобезопасность/Fire and Explosion Safety*. 2024. № 33 (4). С. 36–51. DOI: 10.22227/0869-7493.2024.33.04.36-51. EDN IGFEYS.
21. Гравит М.В., Мамедов Э.З., Дмитриев И.И. Методика расчета фактических и обоснование требуемых пределов огнестойкости стальных конструкций эстакад и этажерок нефтегазового комплекса // *Вестник газовой промышленности*. 2025. № 1 (61). С. 201–214. EDN FKUNAK.
22. Бараишкова Н.К., Кижнер Л.И., Кужевская И.В. Атмосферные процессы: динамика, численный анализ, моделирование : учебное пособие. Томск : ТМЛ-Пресс, 2010. 312 с.

REFERENCES

1. Golovanov V.I., Pekhotikov A.V., Pavlov V.V. Calculation of fire resistance of steel structures with increased fire resistance indicators for oil and gas industry facilities. *Territorija neftegaz/Territory of Oil and Gas*. 2007; 4:72-77. EDN LJMUEX. (rus).
2. Epishchenko S.V., Uskov A.V. Experimental research on the use of carbon dioxide for fire extinguishing in tanks with oil and petroleum products. Current issues of society, science and education : *Collection of articles from the XX International scientific and practical conference, Penza, March 20, 2025*. Penza, Science and Education (IP Gulyaev G.Yu.), 2025; 60-65. EDN MTDFDV. (rus).
3. Dehkordi M.K., Behnam B., Pirbalouti R.G. Probabilistic fire risk analysis of process pipelines. *Journal of Loss Prevention in The Process Industries*. 2022; 80:104907. DOI: 10.1016/j.jlp.2022.104907. EDN AMHAMP.
4. Khasanov I.R., Gravit M.V., Kosachev A.A., Pekhotnikov A.V., Pavlov B.V. Harmonization of European and Russian regulatory documents establishing general requirements for fire-resistance test methods of building constructions and the use of temperature curves that take into account real fire conditions. *Pozharovzryvobezopasnost/Fire and Explosion Safety*. 2014; 23(3):49-57. EDN SFOCFF. (rus).
5. Abramov I.V., Gravit M.V., Gumerova E.I. Increase in the fire resistance limits of ship and building structures with hydrocarbon fire. *Gas Industry*. 2018; 5(768):108-117. EDN XMYFSP. (rus).

6. Klementev B.A., Kalach A.V., Gravit M.V. A comparative analysis of the requirements of Russia and the United States to the fire resistance of building structures of oil refineries and petrochemical plants. *Pozharovzryvobezопасnost/Fire and Explosion Safety*. 2021; 30(5):5-22. DOI: 10.22227/0869-7493.2021.30.05.5-22. EDN MNGMRT. (rus).
7. Kashi E., Bahoosh M. Jet fire assessment in complex environments using computational fluid dynamics. *Brazilian Journal of Chemical Engineering*. 2020; 37(1):203-212. DOI: 10.1007/s43153-019-00003-y. EDN GUWZFG.
8. Shebeko A.Yu. Estimation of required fire resistance limits of bearing structures of refinery platforms and pipe racks. *Pozharnaya bezопасnost/Fire safety*. 2019; 1:103-107. EDN YZZZML. (rus).
9. Džolev I., Kekez-Baran S., Rašeta A. Fire Resistance of Steel Beams with Intumescent Coating Exposed to Fire Using ANSYS and Machine Learning. *Buildings*. 2025; 15(13):2334. DOI: 10.3390/buildings15132334
10. Chen W., Qin Q., Wang X., Li J., Liang M., Chen Z., Yang T. Study on the Fire Resistance of Axially Restrained H-Shaped Steel Beams Under Real Fire. *Applied Sciences*. 2025; 15(13):7424. DOI: 10.3390/app15137424
11. Simão P.D., Rodrigues J.P.C. Direct evaluation of fire resistance for restrained steel columns in frames using consistent rigid-plastic models and energy formulations. *Engineering Structures*. 2023; 276:115344. DOI: 10.1016/j.engstruct.2022.115344. EDN MGXULQ.
12. Tian Zh., Chen X., Suendermann B., Gamble G., Huang Z., Tang Y. Wind Effect on External Fire Spread through Openings under the Protection of Horizontal Projections or Vertical Spandrels — A Numerical Study. *Fire*. 2024; 7(3):66. DOI: 10.3390/fire7030066. EDN LEEHQP.
13. Buyanov V.I., Chertov V.A. Taking into account the influence of wind direction when ensuring smoke-free operation of high-rise buildings during a fire. *Problems of ensuring safety during emergency response*. 2014; 1(3):172-174. EDN VPSURD. (rus).
14. Shojaei Mehr R., Mohammadian Bishe E., Farhanieh B., Afshin H. Numerical Investigation of the Combined Effect of Terrain Slope and Wind Velocity on Fire Spread Rate in Natural Pastures. *Modelling*. 2025; 6(1):15. DOI: 10.3390/modelling6010015. EDN BQERSU.
15. Javaloyes M.A., Pendás-Recondo E., Sánchez M.A. General Model for Wildfire Propagation with Wind and Slope. *SIAM Journal on Applied Algebra and Geometry*. 2013; 7(2):414-439. DOI: 10.1137/22M1477866. EDN LZMZRI.
16. Ghodrat M., Edalati-Nejad A., Simeoni A. Collective Effects of Fire Intensity and Sloped Terrain on Wind-Driven Surface Fire and Its Impact on a Cubic Structure. *Fire*. 2022; 5(6):208. DOI: 10.3390/fire5060208. EDN QBGKOP.
17. Eftekharian E., Ghodrat M., He Y., Ong R.H., Kwok K.C.S., Zhao M. Numerical Analysis of the Effect of Fire Source Configuration on Fire-Wind Enhancement. *Heat Transfer Engineering*. 2019; 42(1):41-60. DOI: 10.1080/01457632.2019.1685249
18. Eftekharian E., Ghodrat M., He Y., Zhao M., Ong R.H., Kwok K.C.S. Numerical analysis of wind velocity effects on fire-wind enhancement. *International Journal of Heat and Fluid Flow*. 2019; 80:108471. DOI: 10.1016/j.ijheatfluidflow.2019.108471. EDN AKQEAE.
19. Beshir M.R., Mohamed M., Kouritem S.A., Lemmert C.K., Centeno F.R., Rush D. Investigating Numerically the Effect of Wind on Fire Spread Between Two Informal Settlements Dwellings. *Fire Technology*. 2023; 61:1233-1268. DOI: 10.1007/s10694-023-01374-y. EDN SALEGS.
20. Gravit M.V., Mamedov E.Z. Oil and gas fields at pad wells: modeling of fire resistance of steel trestle structures. *Pozharovzryvobezопасnost/Fire and Explosion Safety*. 2024; 33(4):36-51. DOI: 10.22227/0869-7493.2024.33.04.36-51. EDN IGFEYS. (rus).
21. Gravit M.V., Mamedov E.Z., Dmitriev I.I. Procedure for calculating factual fire endurance and validation of the corresponding guide standards for steel-framed pipe racks of oil-and-gas production facilities. *Bulletin of the gas industry*. 2025; 1(61):191-204. EDN FKUNAK. (rus).
22. Barashkova N.K., Kizhner L.I., Kuzhevskaya I.V. Atmospheric Processes: Dynamics, Numerical Analysis, and Modeling : *textbook*. Tomsk, TML-Press, 2010; 312.

Поступила 30.07.2025, после доработки 03.09.2025;

принята к публикации 03.09.2025

Received July 30, 2025; Received in revised form September 03, 2025;

Accepted September 03, 2025

Информация об авторах

ГРАВИТ Марина Викторовна, к.т.н., доцент, доцент Высшей школы промышленно-гражданского и дорожного строительства, Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого, Россия, 195251, г. Санкт-Петербург, вн. тер. г. муниципальный округ Академическое, ул. Поли-

Information about the authors

Marina V. GRAVIT, Cand. Sci. (Eng.), Associate Professor at the Higher School of Industrial, Civil and Road Construction, Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University, vn. terg. municipal district Akademicheskaya, Politeknicheskaya St., 29, letter B, St. Petersburg, 195251, Russian Federation; ORCID:

техническая, 29, литера Б; ORCID: 0000-0003-1071-427X; ResearcherID: B-4397-2014; AuthorID: 56826013600; e-mail: marina.gravit@mail.ru

0000-0003-1071-427X; ResearcherID: B-4397-2014; AuthorID: 56826013600; e-mail: marina.gravit@mail.ru

МАМЕДОВ Эльдар Захирович, специалист, ООО «Запсибгазпром-Газификация», Россия, 625059, г. Тюмень, тракт Велижанский 6 км, 11, помещ. 207; ORCID: 0009-0008-4470-2465; e-mail: el.mamedov7578@gmail.com

Eldar Z. MAMEDOV, specialist, “Zapsibgazprom-Gazifikatsiya” LLC, Velizhansky tract 6 km, 11, room 207, Tyumen region, Tyumen, 625059, Russian Federation; ORCID: 0009-0008-4470-2465; e-mail: el.mamedov7578@gmail.com

АНТОНОВ Максим Дмитриевич, инженер, ООО «Метропроект», 196233, г. Санкт-Петербург, вн. тер. г. муниципальный округ Гагаринское, пр-т Витебский, 109, литера В, помещ. 2-N; ORCID: 0009-0009-7146-1668; e-mail: antomaxnov2019@yandex.ru

Maksim D. ANTONOV, engineer, “Metroproject” LLC, internal territory of the city municipal district Gagarinskoye, Vitebsky Ave., 109B, room 2-N, St. Petersburg, 196233, Russian Federation; ORCID: 0009-0009-7146-1668; e-mail: antomaxnov2019@yandex.ru

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

Contribution of the authors: *the authors contributed equally to this article.*
The authors declare no conflicts of interests.

Пожарная опасность тепличных комплексов и возможные риски последствий пожаров

Александр Георгиевич Фирсов, Марина Викторовна Загуменнова ✉,
Олег Витальевич Надточий, Екатерина Николаевна Малёмина

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. Обеспечение продовольственной безопасности — одна из приоритетных целей устойчивого развития на период до 2030 года. Для обеспечения достижения этой цели в Российской Федерации внедряются новые технологии ведения сельского хозяйства. Большое развитие в этом плане получило тепличное производство. Передовые технологии для теплиц обеспечивают конкурентные преимущества, такие как максимальная продуктивность, улучшение качества продукции, сокращение расходов и более экологичная эксплуатация. Тем не менее это влечет за собой и увеличение существующих пожарных рисков и как следствие — увеличение объема ожидаемых последствий пожаров. Авторами рассмотрена существующая классификация и основные виды тепличных комплексов, их строительные и объемно-планировочные характеристики, а также пожарная опасность данных объектов.

Цели и задачи. Целью настоящей статьи является анализ пожарной опасности тепличных комплексов, оценка ожидаемых рисков последствий пожаров на данных объектах, а также обзор существующей нормативно-правовой базы в области обеспечения пожарной безопасности тепличных комплексов.

Материалы и методы. Проведен анализ статистических данных по пожарам и их последствиям в тепличных комплексах в Российской Федерации за 2018–2024 гг. Проанализированы основные требования пожарной безопасности, предъявляемые к сельскохозяйственным тепличным комплексам.

Результаты и обсуждение. На основе статистической информации осуществлен расчет ожидаемых последствий пожаров на данных объектах. Полученные результаты исследований показывают, что современные тепличные комплексы характеризуются не только значительным потенциальным риском возникновения пожаров, но и значительной величиной ожидаемых последствий. Использование современного высокотехнологичного оборудования для ведения сельского хозяйства влечет за собой увеличение существующих пожарных рисков, особенно рисков материальных последствий от пожаров.

Выводы. На основе проведенных исследований авторами предложены пути дальнейшего развития системы обеспечения пожарной безопасности сельскохозяйственных тепличных комплексов.

Ключевые слова: пожар; теплица; парник; гибель; травмирование; пожарная опасность; продовольственная безопасность

Для цитирования: Фирсов А.Г., Загуменнова М.В., Надточий О.В., Малёмина Е.Н. Пожарная опасность тепличных комплексов и возможные риски последствий пожаров // Пожаровзрывобезопасность/Fire and Explosion Safety. 2025. Т. 34. № 5. С. 16–26. DOI: 10.22227/0869-7493.2025.34.05.16-26

✉ Загуменнова Марина Викторовна, e-mail: mary.mar2005@yandex.ru

Fire hazard of greenhouse complexes and possible risks of fire consequences

Alexander G. Firsov, Marina V. Zagumenнова ✉, Oleg V. Nadtochiy, Ekaterina N. Malemina

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. Ensuring food security is one of the priority goals of sustainable development for the period until 2030. To ensure the achievement of this goal, new agricultural technologies are being introduced in the Russian Federation. Greenhouse production received great development in this regard. Advanced greenhouse technologies provide competitive advantages such as maximized productivity, improved product quality, reduced costs

and more environmentally friendly operation. However, this also entails an increase in existing fire risks and, as a consequence, an increase in the volume of expected consequences of fires. The authors considered the existing classification and main types of greenhouse complexes, their construction and volume-planning characteristics, as well as the fire risk of these facilities.

Goals and objectives. The purpose of this paper is to analyze the fire hazard of greenhouse complexes, assess the expected risks of fire consequences at these facilities, and review the existing regulatory framework in the field of ensuring fire safety of greenhouse complexes.

Materials and methods. The statistical data on fires and their consequences in greenhouse complexes in the Russian Federation for 2018–2024 were analyzed. The main fire safety requirements for agricultural greenhouse complexes were analyzed.

Results. Based on statistical information, a calculation was made of the expected consequences of fires at these facilities. The obtained research results show that modern greenhouse complexes are characterized not only by a significant potential risk of fires, but also by a significant magnitude of expected consequences. The use of modern high-tech equipment for agriculture entails an increase in existing fire risks, especially the risk of material consequences from fires.

Conclusions. Based on the conducted research, the authors proposed ways of further development of the fire safety system for agricultural greenhouse complexes.

Keywords: fire; greenhouse; hothouse; death; injury; fire hazard; food safety

For citation: Firsov A.G., Zagumennova M.V., Nadtochiy O.V., Malemina E.N. Fire hazard of greenhouse complexes and possible risks of fire consequences. *Pozharovzrybovbezopasnost'/Fire and Explosion Safety*. 2025; 34(5):16-26. DOI: 10.22227/0869-7493.2025.34.05.16-26 (rus).

✉ Marina Victorovna Zagumennova, e-mail: mary.mar2005@yandex.ru

Введение

Повышение производительности сельского хозяйства и стабильное производство продовольствия имеют решающее значение для достижения целей устойчивого развития (далее — ЦУР) как в Российской Федерации, так и во всем мире [1, 2]. Обеспечение продовольственной безопасности — одно из приоритетных направлений реализации ЦУР, которая направлена на сокращение рисков угрозы голода. Для продовольственного и сельскохозяйственного секторов разрабатываются оперативные меры для обеспечения их жизнеспособности и снижения риска природных и техногенных бедствий (чрезвычайные ситуации, пожары и т.п.), оказывающих значительное воздействие на продовольственную безопасность. Масштабные преобразования в области сельскохозяйственного производства к 2030 г. должны обеспечить создание устойчивых систем производства продуктов питания, внедрить инновационные методы ведения сельского хозяйства, которые позволят повысить качество и увеличить объемы производства. Это должно сопровождаться сохранением экосистем, укреплением способности адаптироваться к изменению климата, экстремальным погодным явлениям и другим бедствиям и постепенно улучшать качество земель и почв [1]. Для активно развивающейся сферы сельского хозяйства для решения поставленных целей применяются аграрные тепличные комплексы. Таким образом, исходя из вышесказанного, основной целью данного исследования является системный анализ пожарной опасности современных тепличных сельскохозяйственных комплексов, оценка эффективности существующих требований

пожарной безопасности, предъявляемых к ним, определение ожидаемых рисков последствий пожаров и путей дальнейшего совершенствования систем пожарной безопасности данных объектов защиты.

Идея создания сооружений с искусственными климатическими условиями для выращивания экзотических растений и сельскохозяйственных культур родилась еще около 4 тыс. лет тому назад в Древнем Египте. Сооружения, близкие по своим конструктивным особенностям к современным парникам, появились примерно в 30 г. н. э. в Римской империи [3, 4]. В дальнейшем в разных странах (в основном на территории Европы), где использовались парники, в их конструкцию постоянно вносились изменения, учитывающие местные природно-климатические и социально-экономические особенности территорий (отапливаемые теплицы, большие по своим размерам оранжереи и т.д.). Однако наибольшая популярность и доступность теплиц и парников связана с индустриализацией XX века. Появление в 60-70-х гг. полимерной (полиэтиленовой) пленки дало возможность использовать парники и теплицы практически на всей территории рискованного земледелия, а также внедрить гибридные сорта сельскохозяйственных культур, дающие более ранние урожаи даже в местах с суровыми климатическими условиями. Позднее вместо пленки стали использовать пластик, в том числе структурированный поликарбонат. Новые конструктивные решения позволили сделать сооружения более экономичными, легкими, светлыми, быстровозводимыми, а также неограниченными по площади и высоте. Все это в комплексе позволило значительно снизить затраты на строительство и эксплуатацию парников и теплиц.

Современные парники и теплицы — это высокотехнологичные производственные сооружения, нивелирующие влияние внешних неблагоприятных климатических условий на процесс выращивания различных сельскохозяйственных культур. Они предназначены для получения стабильного урожая аграрной продукции. Основное различие парников и теплиц заключается в том, что парник — это неотапливаемое культивационное сооружение со светопрозрачным покрытием, а теплица, наоборот, отапливаемое сооружение со светопроницаемыми ограждающими конструкциями, позволяющее осуществлять сельскохозяйственные работы внутри данного сооружения. Нормативный срок службы парников определен 5 годами, а теплиц — не менее 15 лет. По конструктивным особенностям парники, агропромышленные и фермерские теплицы (далее — тепличные комплексы) делятся на однопролетные (ангарные), многопролетные (блочные) и модульные¹. По типу покрытия они могут быть: стеклянные, пленочные и поликарбонатные. По своему назначению и использованию они подразделяются на следующие категории: производственные, фермерские и сезонные. Площадь производственных тепличных комплексов, как правило, составляет более 3 га, а фермерских — от 0,2 до 2 га². Сезонные теплицы чаще всего однопролетные сооружения, характеризующиеся наибольшими размерами, и предназначены для выращивания сельхозпродукции исключительно в теплый период года [4].

Наибольшее распространение сегодня в сельском хозяйстве России получили промышленные тепличные комплексы Venlo, представляющие собой набор взаимосвязанных блоков жизнеобеспечения [5, 6]. Пример размещения структурных блоков, обеспечивающих функционирование тепличного комплекса, приведен на рис. 1.

Основной и самый большой блок — это сама теплица, которая оборудуется следующими системами управления производственным процессом [6]:

- система полива и дозирования удобрений (прецизионное распределение влаги и нутриентов);
- система формирования микроклимата (оптимизация температурно-влажностного режима и состава воздуха);
- система дезинфекции дренажных растворов (очистка и обеззараживание использованной воды);

¹ СП 107.13330.2012. Теплицы и парники. Актуализированная редакция СНиП 2.10.04–85.

² Промышленные теплицы: классификация, особенности и оборудование. URL: <https://verum-agro.ru/novosti/promyshlennye-teplicy-klassifikaciya-osobennosti-i-obvnie/?ysclid=ma6fcks3zq737852076> (дата обращения: 12.05.2025).



Рис. 1. Размещение структурных блоков, обеспечивающих функционирование тепличного комплекса (Источник: агрокомбинат «Южный»)

Fig. 1. Placement of structural blocks that ensure the functioning of the greenhouse complex (Source: Yuzhny Agro-industrial complex)

- система вентиляции и кондиционирования воздуха (вентиляторы и кондиционеры, обеспечивающие воздухообмен и регулировку температуры);
- система отопления (печное, газовое, электрическое);
- система освещения (светодиодные светильники, фитолампы и др.).

Достижения в области тепличных технологий произвели революцию в сельском хозяйстве, обеспечивая устойчивые и эффективные способы удовлетворения растущего спроса на сельскохозяйственную продукцию.

Несмотря на то что технологические достижения способствуют повышению продовольственной безопасности государства, следует отметить, что применение современных высокотехнологичных систем, обеспечивающих функционирование тепличных комплексов, является возможным новым источником опасностей и угроз [7]. Такие сельскохозяйственные объекты представляют собой уникальную проблему, связанную с тем, что они часто расположены в отдаленных местах и не находятся под постоянным наблюдением, что характеризуется серьезной пожарной опасностью с точки зрения предотвращения и тушения пожаров. Последствия пожара могут быть серьезными из-за большого количества оборудования и материалов, используемых в тепличных комплексах. Они характеризуются значительной пожарной нагрузкой, выраженной в виде горючих синтетических строительных конструкций (полимерная пленка, структурированный поликарбонат), горизонтальных и вертикальных затеняющих шторных экранов, выполненных из полиэстера с вкраплением алюминиевых нитей, полипропиленовых прикорневых тканей и другого горючего укрывного материала, полихлорвиниловых трубопроводов и капельных систем полива, проложенных открытым способом, пластиковой тары и переходных мостков,

горючих лотков и коробов для прокладки электрических кабелей, а также самой изоляции электрических кабелей. Потенциально и сами растения, теряющие влагу (высыхающие) в процессе развития пожара, могут способствовать активному распространению огня. Комплексное сочетание перечисленных выше факторов ведет к повышению рисков возникновения пожаров и их последствий.

Материалы и методы

По уровню пожарной опасности тепличные комплексы относятся к категории Д (исключение составляют объекты с газовой системой обогрева), классу конструктивной пожарной опасности — С3, классу функциональной пожарной опасности — Ф5.3 и степени огнестойкости — V. Причем изменение степени огнестойкости и класса конструктивной пожарной опасности осуществляется с учетом пределов огнестойкости и классов пожарной опасности, существующих строительных конструкций и подтверждается соответствующим заключением от МЧС России¹. Несущие и ограждающие конструкции изготавливаются, как правило, из металлического профиля без использования специальных огнезащитных средств и имеют предел огнестойкости R8, что ведет к потере несущей способности железного каркаса при пожаре уже через 8–10 мин. Дополнительно при деформации металлических конструкций происходит разрушение стеклянных переплетов и их обломки при падении могут травмировать людей, находящихся в помещении, в том числе и личный состав оперативного пожарного подразделения, осуществляющего действия по тушению пожара [8]. Сезонные теплицы могут быть изготовлены из деревянных или пластиковых строительных конструкций, что, в свою очередь, еще больше увеличивает существующую пожарную нагрузку.

Пожарная опасность тепличных комплексов также связана с использованием большого количества различного электрического оборудования и приборов. Это устройства вентиляции и кондиционирования воздуха, электрического отопления, различные механизмы контроля климатических параметров воздуха, контроля продукции и воздушного орошения растений и другие. В качестве технологического (искусственного) освещения в помещениях тепличных комплексов используются натриевые лампы высокого давления (давление внутри колбы 10 кПа), дающие необходимый спектр света для интенсивного роста растений. Однако такие электрические лампы взрывоопасны и имеют высокую температуру внутренней горелки 650–750° С, а наружную температуру колбы — от 250° С (при

мощности лампы 70 Вт) до 480°С (при мощности лампы 600 Вт)^{3,4}.

Не меньшую опасность представляет и система отопления помещений тепличного комплекса. Так, температура теплоносителя в производственных и фермерских тепличных комплексах «подпочвенного и субстратного обогрева — 40°С, подстеллажного — 65–75°С, бокового — до 90°С, остальных систем — до 115°С»⁵. Дополнительно могут использоваться инфракрасные отопительные приборы. В сезонных теплицах в качестве отопительных приборов чаще используются электрические калориферы и теплогенераторы. Все это является потенциальным источником пожара и в целом увеличивает пожарную опасность тепличных комплексов.

Пожарная опасность тепличных комплексов характеризуется их объемно-планировочными решениями. Как уже отмечалось выше, данные сооружения имеют большие площадные и объемные характеристики. Они, как правило, оборудуются двумя эвакуационными выходами, которые расположены в торцах галереи в диаметрально противоположных направлениях. Результаты исследований, приведенные в работе [9], показывают, что при неблагоприятном развитии пожара, блокирующем один из выходов, людям при эвакуации потребуется преодолеть значительное расстояние порядка 100–300 м и более до другого эвакуационного выхода. При этом критические значения опасных факторов пожара (задымленность, потеря видимости, высокая температура) наступают практически молниеносно и тем самым представляют угрозу жизни и здоровью людей. Пожар в тепличном комплексе, скорее всего, будет иметь объемный характер развития. Для понимания этих процессов необходимы всесторонние исследования.

В дополнение к сказанному помещения тепличных комплексов не оборудуются внутренним противопожарным водопроводом. Что, конечно, негативно сказывается на возможности ликвидации пожара еще в начальной стадии его развития. Исключение в данном случае составляют тепличные комплексы, использующие для отопления природный газ, которые в соответствии с требованиями пожарной безопасности должны оборудоваться внутренним противопожарным

³ ГОСТ Р МЭК 60192–2011. Лампы натриевые низкого давления. Эксплуатационные требования. URL: www.standards.ru

⁴ ГОСТ Р 53073–2008. Лампы натриевые высокого давления. Эксплуатационные требования. URL: www.standards.ru

⁵ Строительство промышленных теплиц в фермерском хозяйстве. URL: troitelstvo/stroitelstvo-promyishlennyih-teplits-v-fermerskom-hozyaystve (дата обращения: 04.05.2025).

водопроводом⁶. Также необходимо отметить, что в современных тепличных комплексах (особенно производственного назначения) для фотосинтеза растений используется повышенная концентрация углекислого газа. Поэтому при возникновении пожара возможно резкое снижение концентрации кислорода в воздухе, а концентрация кислорода в воздухе является одним из опасных факторов пожара, угрожающих жизни и здоровью людей [9].

Пожарная опасность тепличных комплексов также обусловлена наличием на их территории складов удобрений и ядохимикатов (например, аммиачная селитра), складов тары и готовой продукции, котельной (на газовом, жидком или твердом топливе)⁷. Большую опасность представляют камеры дозаривания, которые по своей взрывопожарной опасности относятся к категории А¹. В них осуществляется доведение незрелых плодов до состояния потребительской спелости. Конструктивно камеры дозаривания представляют собой герметичные газовые устройства с регулируемой температурой, влажностью и дозатором для подачи газа этилена, который, в свою очередь, является взрывопожароопасным газом [10]. Не менее опасны электрические энергоблоки, обеспечивающие бесперебойную работу всего тепличного комплекса круглосуточно. Неправильный монтаж и нарушения при эксплуатации электрооборудования (перегрузка, короткое замыкание, нарушение изоляции, неверный выбор сечения жил электрических проводов) могут привести к возникновению пожара. Таким образом, совокупность различных объектов, входящих в состав тепличного комплекса, в целом формирует его высокую пожарную опасность.

В соответствии с существующим учетом пожаров и их последствий и регламентом предоставления ведомственной статистической информации [11, 12] теплицы, парники и аналогичные объекты относятся к группе объектов сельскохозяйственного растениеводства. С целью использования единой терминологии в рамках данной статьи для обозначения группы объектов сельскохозяйственного растениеводства будет использоваться термин «тепличные комплексы».

⁶ Технический регламент о требованиях пожарной безопасности : Федеральный закон от 22.07.2008 № 123-ФЗ (последняя редакция). URL: www.standards.ru

⁷ Пожарная безопасность сельскохозяйственных предприятий // ООО Гефест-Аларм. URL: <https://www.gefestalarm.ru/news/pozharnaya-bezopasnost-selskohozyajstvennyh-predpriyatij> (дата обращения: 11.05.2025).



Рис. 2. Динамика распределения количества пожаров в тепличных комплексах за 2018–2024 гг.

Fig. 2. Dynamics of the distribution of the number of fires in greenhouse complexes for 2018–2024

По статистическим данным^{8, 9, 10} в тепличных комплексах ежегодно регистрируется около 26 пожаров, которые уничтожают и повреждают площадь (далее — площадь пожара) более 4681 м² и наносят материальный ущерб в размере 27 287 тыс. руб. По расчетам при пожарах в среднем погибает 0,14 чел. и получают травмы 1,29 чел. На рис. 2–4 приведена динамика пожаров и их основных последствий на данных объектах за 2018–2024 гг. на территории Российской Федерации.

Анализ статистических данных, приведенных на графиках (рис. 3), показывает, что наибольшая амплитуда количества пожаров и их последствий соответствует периоду 2020–2023 гг., а линейный тренд указывает на динамику роста количества пожаров, консолидированного количества площади пожара и величины материального ущерба от пожара.

Динамика распределения консолидированного количества погибших и травмированных людей при пожаре имеет четко выраженную тенденцию снижения числовых значений (рис. 4). Необходимо отметить, что в 2020 г. была зафиксирована гибель людей при пожаре 1 чел. и травмирование людей при пожаре 3 чел. личного состава оперативных подразделений пожарной охраны при тушении пожара в тепличных комплексах.

Основные причины возникновения пожаров на данных объектах отражены на рис. 5. Порядка 31 % пожаров связаны с нарушениями устройства (эксплуатации) различного электрического оборудования. Более 26 % зарегистрированных пожаров

⁸ Пожары и пожарная безопасность в 2024 году : информационно-аналитический сборник / В.С. Гончаренко, Т.А. Четчина, В.И. Сибирко и др. Балашиха : ФГБУ ВНИИПО МЧС России, 2025. 112 с.

⁹ Пожары и пожарная безопасность в 2023 году : информационно-аналитический сборник / В.С. Гончаренко, Т.А. Четчина, В.И. Сибирко и др. Балашиха : ФГБУ ВНИИПО МЧС России, 2024. 110 с.

¹⁰ Пожары и пожарная безопасность в 2022 году : информационно-аналитический сборник / В.С. Гончаренко, Т.А. Четчина, В.И. Сибирко и др. Балашиха : ФГБУ ВНИИПО МЧС России, 2023. 80 с.

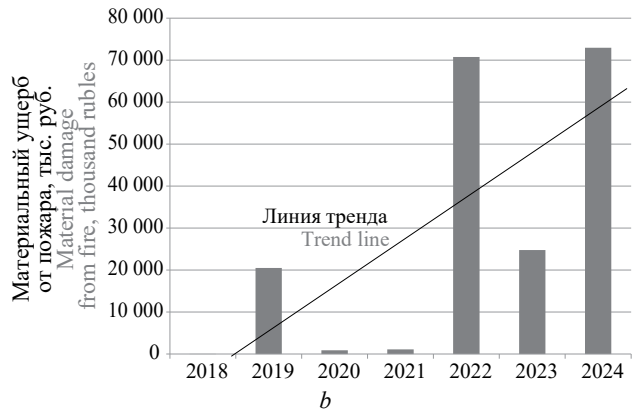
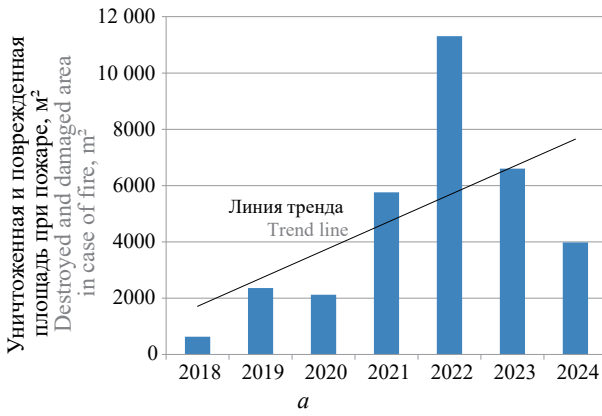


Рис. 3. Динамика распределения площади пожара (а) и материального ущерба от пожара (b) в тепличных комплексах за 2018–2024 гг.
Fig. 3. Dynamics of the distribution of fire area (a) and material damage from fire (b) in greenhouse complexes for 2018–2024

происходит из-за неосторожного обращения с огнем. Третья ведущая причина пожара — это нарушение правил пожарной безопасности при устройстве и эксплуатации печного оборудования (19,6 %).

Одним из параметров, характеризующих комплексное состояние пожарной опасности здания (сооружения), является год его ввода в эксплуатацию, постройки или капитального ремонта. Теоретически чем старше здание, тем больше должен быть уровень его пожарной опасности. Это может быть связано с несоответствием объемно-планировочных и конструктивных решений, технологического процесса производства и технического оборудования, а также систем обеспечения пожарной безопасности современным нормативным требованиям, предъявляемым к объектам. Однако, что касается рассматриваемых объектов, то здесь прослеживается иная статистическая картина. На рис. 6 приведено распределение количества пожаров в тепличных комплексах в зависимости от года ввода в эксплуатацию за 2018–2024 гг. Надо отметить, что наименьшее

количество пожаров отмечается в период более ранней постройки (1937–1989 гг.). А наибольшее количество пожаров приходится на период ввода в эксплуатацию — 2014–2020 гг.

По мнению авторов, это может быть связано с тем, что с каждым годом увеличивается количество промышленных тепличных комплексов, насыщенных значительным количеством различных электронных устройств и электрических приборов. Поэтому количество пожаров, их ожидаемые

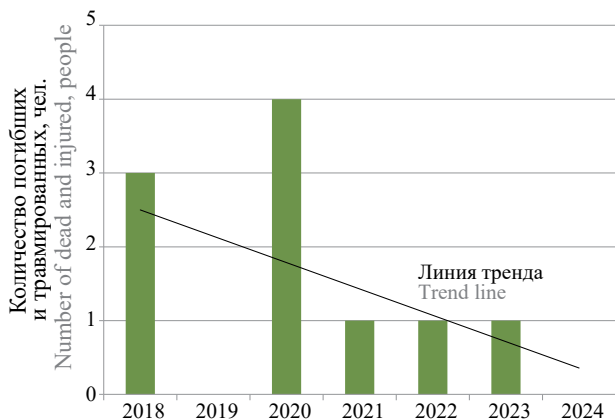
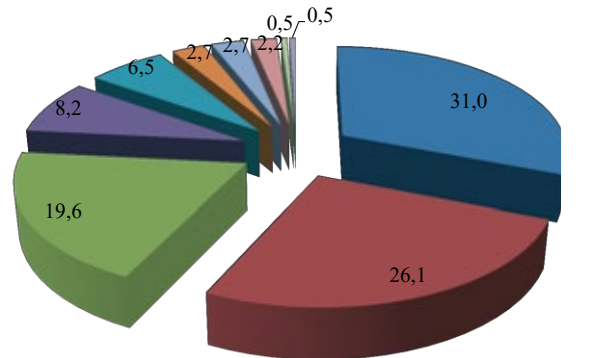


Рис. 4. Динамика распределения консолидированного количества погибших и травмированных людей при пожарах в тепличных комплексах за 2018–2024 гг.
Fig. 4. Dynamics of the distribution of the consolidated number of dead and injured people in fires in greenhouse complexes for 2018–2024



- НПУиЭ электросетей и электрооборудования
VRIO of electric networks and electrical equipment
- Самовозгорание веществ и материалов
Spontaneous combustion of substances and materials
- Неосторожное обращение с огнем
Careless hanging of fire
- Нарушение технологического регламента процесса производства
Violation of the technological regulation of the production process
- НПУиЭ печного оборудования
VRIO of furnace equipment
- Взрывы
Explosions
- Поджог
Arson
- Грозовые разряды
Lighting discharges
- Нарушение ППБ при проведении электрогазосварочных работ
Violation of FS during electric and gas welding operation
- Прочие и неустановленные причины
Other and unknown causes

Рис. 5. Долевое распределение количества пожаров в тепличных комплексах по причинам их возникновения за 2018–2024 гг.
Fig. 5. The share distribution of the number of fires in greenhouse complexes by the causes of their occurrence in 2018–2024

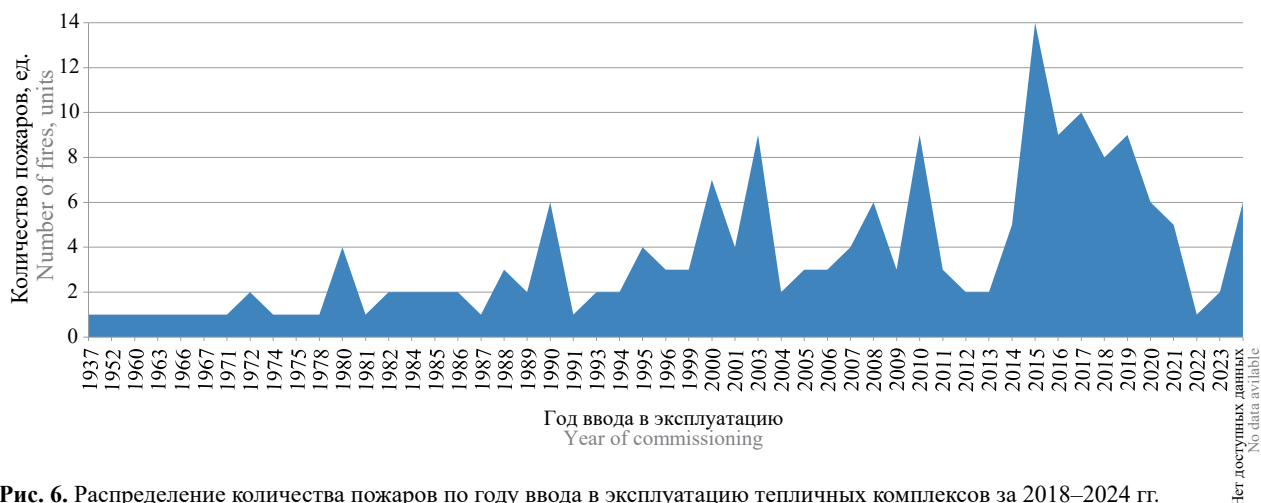


Рис. 6. Распределение количества пожаров по году ввода в эксплуатацию тепличных комплексов за 2018–2024 гг.
Fig. 6. Distribution of the number of fires by the year of commissioning of greenhouse complexes for 2018–2024

последствия, а также риски угрозы жизни и здоровью людей будут постоянно увеличиваться.

Результаты и обсуждение

Несмотря на относительно небольшое количество пожаров на рассматриваемых объектах, риски их последствий за анализируемый период времени являются значительными. В свою очередь, оценка ожидаемых рисков последствий пожаров позволит выявить существующие проблемы в обеспечении пожарной безопасности и разработать предложения по дальнейшему совершенствованию систем пожарной опасности тепличных комплексов. Определение ожидаемых рисков последствий пожаров на тепличных комплексах осуществлялось путем расчета числовых значений зарегистрированных последствий пожара (уничтоженная и поврежденная площадь, количество погибших и травмированных людей, материальный ущерб) на один зарегистрированный пожар за анализируемый временной период (2018–2024 гг.). Более подробно используемый метод расчета ожидаемых последствий пожаров приведен в источниках [13, 14]. Результаты полученных расчетов приведены в таблице.

Расчетные значения ожидаемых рисков показывают, что ожидаемая площадь пожара составляет более 178 м²/пожар, а прямой материальный ущерб более 1 млн руб./пожар. Ожидаемый риск угрозы жизни и здоровью людей составляет $5 \cdot 10^{-2}$, что не соответствует принятым нормативным значениям 10^{-6} . Немаловажным является тот факт, что процессы производства постоянно совершенствуются. Внедрение технологий «умного» сельского хозяйства, автоматизация и роботизация технологических процессов могут повысить безопасность, снижая риски, связанные с воздействием опасных факторов

пожаров на людей [15–17]. При этом риски угрозы причинения материального ущерба возрастают.

Однако, несмотря на присутствие значительных рисков последствий пожаров для тепличных комплексов в ряде основополагающих нормативных документов^{1, 11}, сегодня нет четких требований по обеспечению пожарной безопасности рассматриваемой группы объектов защиты. Данные документы содержат лишь общие требования к содержанию территорий, зданий и помещений теплиц, а также требования по обеспечению пожарной безопасности других жизнеобеспечивающих блоков (например, склад, котельная, насосная, административное здание и т.д.). Отдельные требования пожарной безопасности применительно к теплицам содержатся в СП¹. Надо отметить, что нормативные требования основаны на исследованиях в области пожарной безопасности, полученных еще в 80-х гг. прошлого века, и не учитывают современные конструктивно-планировочные особенности, технологии производства и выращивания сельскохозяйственных культур, а также современных мер противопожарной защиты для тепличных комплексов.

Так, например, в работе [18] указывается на наличие существующих противоречий между СП¹ и Федеральным законом⁶ в части, касающейся предоставления проектировщикам и заказчикам определенной свободы выбора мер пожарной защиты. Такая ситуация на практике ведет к экономии средств, выделяемых на обеспечение пожарной безопасности, и в целом к увеличению пожарных рисков, что наглядно демонстрирует график на рис. 6. В исследованиях, приведенных в работе [9], отмечено, что инерционность существующих систем пожарной автоматики из-за значительной протяженности

¹¹ Об утверждении Правил противопожарного режима в Российской Федерации : Постановление Правительства РФ от 16.09.2020 № 1479 (ред. от 30.03.2023). URL: www.standards.ru

Расчетные значения ожидаемых рисков последствий пожаров в тепличных комплексах
 Estimated values of the expected risks of fire consequences in greenhouse complexes

Наименование показателя Naming of the indicator	Всего за исследуемый период Total for the study period	Среднее значение The average value	Ожидаемый риск на одном пожаре Expected risk per fire
Консолидированная уничтоженная и поврежденная площади пожара, м ² Consolidated destroyed and damaged fire area, m ²	32 765	4680,71	178,07
Количество погибших людей при пожаре, чел. Number of people killed in the fire, people	1	0,14	0,01
Количество травмированных людей при пожаре, чел. Number of injured people in case of fire, people	9	1,29	0,05
Консолидированное количество погибших и травмированных людей при пожаре, чел. Consolidated number of people killed and injured in the fire, people	10	1,43	0,05
Прямой материальный ущерб от пожара, тыс. руб. Direct material damage from fire, thousand rubles	191 008	27 286,86	1038,09

теплиц не всегда может обеспечить своевременную эвакуацию людей из помещений.

Выводы

Методы ведения тепличного хозяйства становятся все более индустриализированными. Благодаря использованию передовых технологий теплицы превращаются в современные производственные объекты, тепличные комплексы с обширной инфраструктурой, которые максимально эффективно используют ресурсы, улучшая производительность сельского хозяйства. Учитывая рост населения планеты и растущую актуальность проблемы изменения климата, проблемы голода, эти технологии крайне необходимы. Они имеют решающее значение для обеспечения продовольственной безопасности государства и защиты окружающей среды. Инновации должны не только повышать способность к стабильному производству высококачественной продукции, но и обеспечивать безопасность производственного процесса в том числе и в области пожарной безопасности.

Учитывая продолжающийся технологический прогресс, следующее поколение тепличных комплексов будет функционировать уже с использованием искусственного интеллекта. В последнее время эта тенденция набирает обороты благодаря стремительному развитию информационно-коммуникационных технологий, включая облачные вычисления,

Интернет вещей, большие данные, машинное обучение, дополненную реальность и робототехнику [19–21]. Роботизация производственных процессов и автоматизация систем управления пожарной безопасностью на основе машинного обучения и методов компьютерного зрения повысят эффективность управления сельскохозяйственным производством и обеспечат его безопасность. Необходимо разрабатывать стратегические направления развития «умного» сельского хозяйства на основе современных технологий для управления рисками [22, 23], в том числе и пожарными.

С целью снижения количества пожаров и ожидаемых рисков от них необходимо продолжить научные исследования, связанные с изучением пожарной безопасности тепличных комплексов, и разработки новых эффективных средств обнаружения, предотвращения и тушения пожаров с использованием искусственного интеллекта. Одним из направлений таких исследований должен стать всесторонний научный аудит действующих нормативных документов по обеспечению пожарной безопасности тепличных комплексов и их адаптации к современным условиям ведения сельскохозяйственного производства. Оптимальное и устойчивое производство сельхозпродукции может способствовать решению не только проблемы обеспечения продовольственной безопасности страны в целом, но и необходимого государственного суверенитета.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Цели устойчивого развития в Российской Федерации 2023 : краткий статистический сборник // Росстат. М., 2023. 99 с. URL: torage/mediabank/SDG_Russia_2023_RUS.pdf
2. Цвиль М.П. Устойчивое развитие: определение, история развития, цели // Universum: экономика и юриспруденция. 2024. № 8 (118). С. 5–9. EDN UXZPIS.

3. Щеглов Е.В., Никитенко С.В., Рабенко И.А. Революция тепличных комплексов: от пленки до аквапоники и led-освещения // АгроФорум. 2023. № 2. С. 93–95. DOI: 10.24412/cl-34984-2023-2-93-95. EDN BIPXCS.
4. Назарова В.И. Современные теплицы и парники. М. : РИПОЛ классик, 2011. 320 с. EDN QNPERJ.
5. Iddio E., Wang L., Thomas Y., McMorro G., Denzer A. Energy efficient operation and modeling for greenhouses : a literature review // Renewable and Sustainable Energy Reviews. 2020. No. 117. P. 10948. DOI: 10.1016/j.rser.2019.109480. EDN WXVLDU.
6. Клипчаев Э.В. Тепличные комплексы 6-го поколения // Цифровые технологии в сельском хозяйстве: текущее состояние и перспективы развития : мат. II Междунар. науч.-практ. конф. Ставрополь, 20–21 декабря 2023 года. Ставрополь : Ставропольский государственный аграрный университет, 2023. С. 211–216. EDN CTGQRW.
7. Sharma A., Tripathi P. Artificial Intelligence in Agriculture : a Literature Survey // International Journal of All Research Education Scientific Methods. 2021. No. 9 (8). Pp. 510–513. URL: https://www.researchgate.net/publication/353850168_Artificial_Intelligence_in_Agriculture_A_Literature_Survey
8. Барановский А.С., Барановская Е.Н., Полетаев А.Н. Нормативное регулирование в области обеспечения пожарной безопасности. Эвакуация людей из зданий // Актуальные проблемы обеспечения пожарной безопасности и охраны труда : сб. тр. XXXI Междунар. науч.-практ. конф. Том Секция № 11. Химки : Академия гражданской защиты МЧС России, 2021. С. 5–9. EDN FYPRHT.
9. Чудинов А.Н. К вопросу об организации эвакуации людей при пожарах на объектах с протяженным периметром // Актуальные проблемы безопасности в техносфере. 2022. № 4 (8). С. 49–52. DOI: 10.34987/2712-9233.2022.19.95.009. EDN VGJSEA.
10. Земский Г.Т., Возман Л.П., Кондратюк Н.В. Пожарная безопасность теплоносителей для теплогенераторов // Актуальные вопросы пожарной безопасности. 2021. № 3 (9). С. 11–21. DOI: 10.37657/vniipo.avpb.2021.31.82.002. EDN XZTTKK.
11. Шаймитов А.В. Автоматизированная аналитическая система поддержки и управления контрольно-надзорными органами МЧС России как один из видов автоматизации контрольно-надзорной деятельности МЧС России // Молодой ученый. 2023. № 38 (485). С. 233–236. EDN XWFZGI.
12. Сибирко В.И. Свидетельство о государственной регистрации базы данных № RU 2015621277. Федеральная база данных «Пожары»: № 2015620394, заявл. 17.04.2015, опубл. 20.08.2015. Правообладатель: Федеральное государственное бюджетное учреждение «Всероссийский ордена “Знак Почета” научно-исследовательский институт противопожарной обороны Министерства Российской Федерации по делам гражданской обороны, чрезвычайным ситуациям и ликвидации последствий стихийных бедствий» (ФГБУ ВНИИПО МЧС России). EDN SVEXOW.
13. Фирсов А.Г., Загуменнова М.В., Четчина Т.А. Кондиционеры: пожарная опасность, потенциальные риски последствий пожаров и перспективы в обеспечении пожарной безопасности // Техносферная безопасность. 2025. № 1 (46). С. 108–126. EDN OEFXWP.
14. Фирсов А.Г., Загуменнова М.В. Пожарная опасность подземных паркингов, риск возникновения пожаров и их последствий // Транспорт: наука, техника, управление : научный информационный сборник. 2024. № 11. С. 39–47. DOI: 10.36535/0236-1914-2024-11-6. EDN BLDNFH.
15. Rossi P., Mangiavacchi P., Monarca D., Cecchini M. Smart Machinery and Devices for Reducing Risks from Human-Machine Interference in Agriculture : a Review // Safety, Health and Welfare in Agriculture and Agro-food Systems. 2022. Pp. 195–204. DOI: 10.1007/978-3-030-98092-4_21
16. Field W.E. Agriculture-related fires and explosions // Agricultural Mechanization and Automation. No. II. Encyclopedia of Life Support Systems (EOLSS). Paris, France, 2017. URL: <https://www.eolss.net/Sample-Chapters/C10/E5-11-04-05.pdf>
17. Силюянов И. Автоматизация тепличных комплексов // Control Engineering Россия. 2021. № 3 (93). С. 60–62. EDN CNPHJV.
18. Толстых А.В. Обеспечение пожарной безопасности современных тепличных комбинатов // Теория и практика приоритетных научных исследований : сб. науч. тр. по мат. III Междунар. науч.-практ. конф. Смоленск, 30 апреля 2018 года. Смоленск : Общество с ограниченной ответственностью «НОВАЛЕНСО», 2018. С. 165–167. EDN XOKQRF.
19. Kumari A., Prajapati J., Thangavel M. Greenhouse Innovations in Horticulture // Innovations and Emerging Technologies in Horticulture. Elite Publishing House, 2025. Pp. 60–73. URL: https://www.researchgate.net/publication/390160467_Greenhouse_Innovations_in_Horticulture#full-text
20. Качанова О.А., Левоневский Д.К. Архитектура программного обеспечения автоматизированного тепличного комплекса на основе облачных технологий // Программная инженерия. 2021. № 12 (9). С. 475–489. DOI: 10.17587/prin.12.475-489. EDN GDATEP.
21. Maraveas C., Loukatos D., Bartzanas T., Arvanitis K.G. Applications of artificial intelligence in fire safety of agricultural structures // Applied Sciences (Switzerland). 2021. No. 11 (16). P. 7716. DOI: 10.3390/app11167716. EDN UGGBUO.
22. Popkova E.G., Litvinova T.N., Zemskova O.M., Dubkova M.F., Karpova A.A. Strategic Directions for Smart Agriculture Based on Deep Learning for Future Risk Management of Food Security // Food Security in the Economy of the Future. Palgrave Macmillan, Cham., 2023. Pp. 9–17. DOI: 10.1007/978-3-031-23511-5_2

23. Smart Innovation in Agriculture: Part of the Smart Innovation, Systems and Technologies book series /ed. E.G. Popkova, B.S. Sergi. Singapore : Springer Nature Singapore Pte Ltd, 2022. No. 264. 347 p. DOI: 10.1007/978-981-16-7633-8

REFERENCES

1. Sustainable Development Goals in the Russian Federation 2023 : Brief Statistical Bulletin. *Rosstat*. Moscow, 2023; 100. URL: torage/mediabank/SDG_Russia_2023_RUS.pdf (rus).
2. Tsvil M.P. Sustainable Development: Definition, Development History, Aims. *Universum: Economics and Jurisprudence*. 2024; 8(118):5-9. EDN UXZPIS. (rus).
3. Shcheglov E.V., Nikitenko S.V., Rabenko I.A. Revolution of greenhouse complexes: from film to aquaponics and LED lighting. *AgroForum*. 2023; 2:93-95. DOI: 10.24412/cl-34984-2023-2-93-95. EDN BIPXCS. (rus).
4. Nazarova V.I. *Modern greenhouses and hotbeds*. Moscow, RIPOL classic, 2011; 320. EDN QNPERJ. (rus).
5. Iddio E., Wang L., Thomas Y., McMorro G., Denzer A. Energy efficient operation and modeling for greenhouses : a literature review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. 2020; 117:10948. DOI: 10.1016/j.rser.2019.109480. EDN WXVLDU.
6. Klinchaev E.V. Greenhouse complexes of the 6th generation. Digital Technologies in Agriculture: Current State and Development Prospects : *Proceedings of the II International Scientific and Practical Conference. Stavropol, December 20-21, 2023*. 2023; 211-216. EDN CTGQRW. (rus).
7. Sharma A., Tripathi P. Artificial Intelligence in Agriculture : a Literature Survey. *International Journal of All Research Education Scientific Methods*. 2021; 9(8):510-513. URL: https://www.researchgate.net/publication/353850168_Artificial_Intelligence_in_Agriculture_A_Literature_Survey
8. Baranovsky A.S., Baranovskaya E.N., Poletaev A.N. Regulatory in the field of fire safety. Evacuation of people from buildings. Actual problems of fire safety and labor protection : *Collection of works of the XXXI International scientific and practical conference. Volume Section No. 11*. Khimki, Civil Defense Academy of the Ministry of Emergency Situations of Russia, 2021; 5-9. EDN FYPRHT. (rus).
9. Chudinov A.N. On the issue of organizing the evacuation of people in case of fires at facilities with an extended perimeter. *Actual security problems in the technosphere*. 2022; 4(8):49-52. DOI: 10.34987/2712-9233.2022.19.95.009. EDN VGJSEA. (rus).
10. Zemsky G.T., Vogman L.P., Kondratyuk N.V. Fire safety of heat-transfer agents for heat generators. *Current Fire Safety Issues*. 2021; 3(9):11-21. DOI: 10.37657/vniipo.avpb.2021.31.82.002. EDN XZTTKK. (rus).
11. Shaimitov A.V. Automated analytical system for support and management of control and supervisory bodies of the Ministry of Emergency Situations of Russia as one of the types of automation of control and supervisory activities of the Ministry of Emergency Situations of Russia. *Young scientist*. 2023; 38(485):233-236. EDN XWFZGI. (rus).
12. Sibirko V.I. Certificate of state registration of the database No. RU 2015621277. Federal database "Fires": application No. 2015620394, registration date: 17.04.2015, publication date: 20.08.2015. Copyright holder: Federal State Budgetary Institution "All-Russian «Order of the Badge of Honor» Research Institute of Fire Defense of the Ministry of the Russian Federation for Civil Defense, Emergencies, and Elimination of Consequences of Natural Disasters" (FGBU VNIPO EMERCOM of Russia). EDN SVEXOW. (rus).
13. Firsov A.G., Zagumenova M.V., Chechetina T.A. Air conditioners: fire danger, potential risks of fire consequences and prospects in ensuring fire safety. *Technosphere safety*. 2025; 1(46):108-126. EDN OEFXWP. (rus).
14. Firsov A.G., Zagumenova M.V. Fire hazard of underground parking lots, risk of fires and their consequences. Transport: science, equipment, management : *Scientific information collection*. 2024; 11:39-47. DOI: 10.36535/0236-1914-2024-11-6. EDN BLDNFH. (rus).
15. Rossi P., Mangiavacchi P., Monarca D., Cecchini M. Smart Machinery and Devices for Reducing Risks from Human-Machine Interference in Agriculture : a Review. *Safety, Health and Welfare in Agriculture and Agro-food Systems*. 2022; 195-204. DOI: 10.1007/978-3-030-98092-4_21
16. Field W.E. Agriculture-related fires and explosions. *Agricultural Mechanization and Automation, II. Encyclopedia of Life Support Systems (EOLSS)*. Paris, France, 2017. URL: <https://www.eolss.net/Sample-Chapters/C10/E5-11-04-05.pdf>
17. Siluyanov I. Automation of Greenhouse Complexes. *Control Engineering Russia*. 2021; 3(93):60-62. EDN CNPHJV. (rus).
18. Tolstykh A.V. Ensuring fire safety of modern greenhouse complexes. Theory and practice of priority scientific research : *Collection of scientific papers based on the materials of the III International scientific and practical conference. Smolensk, April 30, 2018*. Smolensk, Limited Liability Company "NOVALENKO", 2018; 165-167. EDN XOKQRF. (rus).
19. Kumari A., Prajapati J., Thangavel M. Greenhouse Innovations in Horticulture. *Innovations and Emerging Technologies in Horticulture*. Elite Publishing House, 2025; 60-72. URL: https://www.researchgate.net/publication/390160467_Greenhouse_Innovations_in_Horticulture#full-text
20. Kachanova O.A., Levonevskiy D.K. Software architecture of an automated greenhouse complex based on cloud technologies. *Software engineering*. 2021; 12(9):475-489. DOI: 10.17587/prin.12.475-489. EDN GDATEP. (rus).

21. Maraveas C., Loukatos D., Bartzanas T., Arvanitis K.G. Applications of artificial intelligence in fire safety of agricultural structures. *Applied Sciences (Switzerland)*. 2021; 11(16):7716. DOI: 10.3390/app11167716. EDN UGGBUO.
22. Popkova E., Litvinova T., Zemskova O., Zemskova O.M., Dubkova M.F., Karpova A.A. Strategic Directions for Smart Agriculture Based on Deep Learning for Future Risk Management of Food Security. *Food Security in the Economy of the Future*. Palgrave Macmillan, Cham., 2023; 9-17. DOI: 202310.1007/978-3-031-23511-5_2
23. *Smart Innovation in Agriculture: Part of the Smart Innovation, Systems and Technologies book series*. Ed. E.G. Popkova, B.S. Sergi. Singapore, Springer Nature Singapore Pte Ltd, 2022; 264:347. DOI: 10.1007/978-981-16-7633-8

Поступила 10.06.2025, после доработки 04.09.2025;

принята к публикации 04.09.2025

Received June 10, 2025; Received in revised form September 04, 2025;

Accepted September 04, 2025

Информация об авторах

ФИРСОВ Александр Георгиевич, к.т.н., старший научный сотрудник, ведущий научный сотрудник отдела Пожарной статистики, Всероссийский ордена «Знак Почета» научно-исследовательский институт противопожарной обороны Министерства Российской Федерации по делам гражданской обороны, чрезвычайным ситуациям и ликвидации последствий стихийных бедствий, Россия, 143903, Московская обл., г. Балашиха, мкр. ВНИИПО, 12; ORCID: 0000-0003-3272-1972; AuthorID: 462043; e-mail: otdel-16@vniipo.ru

ЗАГУМЕННОВА Марина Викторовна, начальник сектора отдела Пожарной статистики, Всероссийский ордена «Знак Почета» научно-исследовательский институт противопожарной обороны Министерства Российской Федерации по делам гражданской обороны, чрезвычайным ситуациям и ликвидации последствий стихийных бедствий, Россия, 143903, Московская обл., г. Балашиха, мкр. ВНИИПО, 12; ORCID: 0000-0002-7867-8175; AuthorID: 749141; e-mail: mary.mar2005@yandex.ru

НАДТОЧИЙ Олег Витальевич, старший научный сотрудник отдела Пожарной статистики, Всероссийский ордена «Знак Почета» научно-исследовательский институт противопожарной обороны Министерства Российской Федерации по делам гражданской обороны, чрезвычайным ситуациям и ликвидации последствий стихийных бедствий, Россия, 143903, Московская обл., г. Балашиха, мкр. ВНИИПО, 12; ORCID: 0009-0002-2062-5131; AuthorID: 1098133; e-mail: otdel-16@vniipo.ru

МАЛЁМИНА Екатерина Николаевна, старший научный сотрудник отдела Пожарной статистики, Всероссийский ордена «Знак Почета» научно-исследовательский институт противопожарной обороны Министерства Российской Федерации по делам гражданской обороны, чрезвычайным ситуациям и ликвидации последствий стихийных бедствий, Россия, 143903, Московская обл., г. Балашиха, мкр. ВНИИПО, 12; ORCID: 0000-0003-1327-9381; AuthorID: 1123406; e-mail: otdel-16@vniipo.ru

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

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Information about the author

Alexander G. FIRSOV, Cand. Sci. (Eng), Senior Researcher, Leading Researcher, Department of Fire Statistics, All-Russian Research Institute for Fire Protection of Ministry of Russian Federation for Civil Defense, Emergencies and Elimination of Consequences of Natural Disasters, VNIPO, 12, Balashikha, Moscow Region, 143903, Russian Federation; ORCID: 0000-0003-3272-1972, AuthorID: 462043; e-mail: otdel-16@vniipo.ru

Marina V. ZAGUMENNOVA, Head, Research Sector of the Department of Fire Statistics, All-Russian Research Institute for Fire Protection of Ministry of Russian Federation for Civil Defense, Emergencies and Elimination of Consequences of Natural Disasters, VNIPO, 12, Balashikha, Moscow Region, 143903, Russian Federation; ORCID: 0000-0002-7867-8175; AuthorID: 749141; e-mail: mary.mar2005@yandex.ru

Oleg V. NADTOCHIY, Senior Researcher, Department of Fire Statistics, All-Russian Research Institute for Fire Protection of Ministry of Russian Federation for Civil Defense, Emergencies and Elimination of Consequences of Natural Disasters, VNIPO, 12, Balashikha, Moscow Region, 143903, Russian Federation; ORCID: 0009-0002-2062-5131; AuthorID: 1098133; e-mail: otdel-16@vniipo.ru

Ekaterina N. MALEMINA, Senior Researcher, Department of Fire Statistics, All-Russian Research Institute for Fire Protection of Ministry of Russian Federation for Civil Defense, Emergencies and Elimination of Consequences of Natural Disasters, VNIPO, 12, Balashikha, Moscow Region, 143903, Russian Federation; ORCID: 0009-0002-2062-5131; AuthorID: 1098133; e-mail: otdel-16@vniipo.ru

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

The authors declare no conflicts of interests.

Аналитическая оценка взрывного воздействия на объекты и методика планирования аварийно-восстановительных работ

Александр Алексеевич Руденко ✉

Санкт-Петербургский государственный архитектурно-строительный университет, г. Санкт-Петербург, Россия

АННОТАЦИЯ

Введение. Актуальность аналитического исследования объясняется тем обстоятельством, что к настоящему времени характер и последствия взрывного воздействия на здания и защищенные сооружения исследованы недостаточно и требуют дополнительного анализа и уточнения особенностей проведения аварийно-восстановительных работ.

Целью исследования является аналитический обзор взрывного воздействия на здания, защитные сооружения гражданской обороны (ЗСГО) и их входы (выходы), с разработкой методики планирования аварийно-восстановительных работ.

Теоретические основы. Уточнен состав потенциальных источников взрывного воздействия. Рассмотрены расчетная схема воздействия воздушной ударной волны (ВУВ) и волны сжатия на наземное здание и подземное сооружение, варианты размещения защитных сооружений в различных типах грунтов, а также характер сейсмозрывного воздействия на подземные сооружения.

Результаты и их обсуждение. Проанализированы схема воздействия ВУВ на наземные и подземные эксплуатируемые объекты капитального строительства (ОКС), в том числе и с учетом возможного обрушения наземной части здания на ЗСГО, размещаемые, как правило, не отдельно стоящими, а как подземная часть наземного здания. Проанализированы вероятность и степень разрушения наземных и подземных зданий и сооружений. Оценены варианты использования входов (выходов) из ЗСГО для эвакуации людей.

Выводы. Проведенное исследование позволило определить, что степень повреждения ОКС для всех видов источников взрыва и боеприпасов (в обычном и ядерном исполнении) определяется техническими характеристиками взрывчатого вещества или ядерного заряда, мощностью взрыва, расстоянием до места взрыва, местоположением взрыва (наземный, подземный, воздушный), конструктивными особенностями зданий и сооружений, наличием преград (экранов). Кроме того, следует предусматривать опасные условия воздействия на ОКС от взрыва ядерного заряда. Наибольшую степень защищенности от воздействия ВУВ имеют сквозниковые входы ЗСГО, в отличие от тупиковых, шахтных, прямых и встроенных. В случае если ЗСГО является подземной частью наземного здания, при его разрушении взрывом высока вероятность того, что эвакуировать людей не представится возможным и потребуются аварийно-восстановительные работы для расчистки и восстановления входов (выходов) от образовавшихся завалов.

Ключевые слова: повреждения и разрушения зданий; входы убежищ; защитные сооружения

Данная работа публикуется по результатам выполнения гранта НПР СПбГАСУ № 20-НПР-25 «Организация восстановления и ремонта зданий после взрывного воздействия на основе комплексного подхода с использованием лазерного сканирования, нейросетевого и 3-D моделирования».

Для цитирования: Руденко А.А. Аналитическая оценка взрывного воздействия на объекты и методика планирования аварийно-восстановительных работ // Пожаровзрывобезопасность/Fire and Explosion Safety. 2025. Т. 34. № 5. С. 27–46. DOI: 10.22227/0869-7493.2025.34.05.27-46

✉ Руденко Александр Алексеевич, e-mail.rudenkoa.a@mail.ru

Analytical assessment of explosive impact on facilities and methodology for planning emergency recovery operations

Aleksander A. Rudenko ✉

St. Petersburg State University of Architecture and Civil Engineering, St. Petersburg, Russian Federation

ABSTRACT

Introduction. The relevance of the analytical study is explained by the fact that to date the nature and consequences of explosive impact on buildings and protected structures have not been sufficiently investigated and require additional analysis and clarification of the features of emergency recovery operations.

The purpose of the study is an analytical review of the explosive impact on buildings, civil defence protective structures (CDPS) and their entrances (exits), with the development of a methodology for planning emergency recovery operations.

Theoretical foundations. The composition of potential sources of explosive impact is specified. The design scheme of the impact of air shock wave (ASW) and compression wave on the surface building and underground structure, options for the placement of protective structures in different types of soils, as well as the nature of seismic-explosive impact on underground structures are considered.

The results and their discussion. The scheme of ASW impact on above-ground and underground operated capital construction facilities (CCF) was analyzed, including taking into account the possible collapse of the above-ground part of the building at the CDPS placed, as a rule, not separately standing, but as an underground part of the above-ground building. The probability and degree of collapse of above-ground and underground buildings and structures have been analyzed. The options of using entrances (exits) from CDPS for evacuation of people are assessed.

Conclusions. The study allowed us to determine that the extent of damage to the CCF for all types of explosion sources and munitions (conventional and nuclear) is determined by the technical characteristics of the explosive or nuclear charge, the explosion yield, the distance to the explosion site, the location of the explosion (above-ground, underground, airborne), the structural features of buildings and structures, and the presence of barriers (shields). In addition, it is necessary to provide for hazardous conditions of impact on the CCF from the explosion of a nuclear charge. The greatest degree of protection from the impact of ASW is provided by through-entrances of CDPS, as opposed to dead-end, shaft, straight and built-in entrances. In case a CDPS is an underground part of an aboveground building, in case of its destruction by an explosion, it is highly probable that it will be impossible to evacuate people and emergency recovery operations will be required to clear and restore entrances (exits) from the resulting debris.

Keywords: damage and destruction of buildings; shelter entrances; and defensive structures

This work is published based on the results of the implementation of the NPR grant No. 20-NPR-25 "Organization of restoration and repair of buildings after an explosive impact, based on an integrated approach using laser scanning, neural network and 3-D modelling".

For citation: Rudenko A.A. Analytical assessment of explosive impact on facilities and methodology for planning emergency recovery operations. *Pozharovzryvbezopasnost/Fire and Explosion Safety*. 2025; 34(5):27-46. DOI: 10.22227/0869-7493.2025.34.05.27-46 (rus).

✉ Aleksander Alekseevich Rudenko, e-mail.rudenko.a@mail.ru

Введение

В условиях современного производственно-технологического уклада экономики взрывное воздействие на строительные конструкции зданий и сооружений следует учитывать как один из реальных факторов воздействия на эксплуатируемый производственный объект [1, 2]. Указанное особенно актуально для опасных производственных объектов и объектов, находящихся вблизи, что объясняется сложностью технологических процессов, опасностью их составляющих, факторами чрезвычайных ситуаций^{1,2} (ЧС) различного происхождения, ставшими источниками взрывов на объектах, связанных с эксплуатацией, исследованием, хранением или транспортировкой веществ (элементов, устройств), которые могут привести к взрыву.

Для защиты людей от воздействия опасных производственных факторов на таких объектах и в местах жизнедеятельности людей устраиваются защитные сооружения гражданской обороны (ЗСГО), которые в соответствии с СП 88.13330.2014³ должны оборудоваться надлежащим образом в виде встроенных,

пристроенных, отдельно стоящих, заглубленных или возвышающихся над землей помещений или сооружений. Такие объекты должны обеспечивать гарантированную степень защиты от заданных факторов воздействия на человека в течение предусмотренного времени и быть всегда в надлежащем техническом состоянии.

Техническое состояние зданий и сооружений, в том числе и ЗСГО, оцениваемое через их категории, является определяющим для потенциальной возможности эксплуатации и планирования мероприятий по поддержанию объектов в надлежащем состоянии. В условиях обычного «производственно-бытового» функционирования техническое состояние объектов определяется в основном параметрами их физического и морального износа, и возможно снижаясь в связи с нарушениями, допущенными в процессе проектирования, строительства или повседневной эксплуатации [3, 4].

В режиме мониторинга это оценивается и прогнозируется достаточно точно, что подтверждено практикой эксплуатации зданий и сооружений. Однако при воздействии аварийных взрывных нагрузок характер воздействия и повреждений строительных конструкций и здания в целом часто определить сложно, что объясняется комплексом субъективных и объективных причин.

При этом вопросам оценки характера и последствий чрезвычайных ситуаций техногенного характера посвящен ряд исследований, что рассматривалось в том числе и в работах таких ученых, как Д.А. Король-

¹ В Нью-Дели произошло землетрясение // РИА НОВОСТИ. URL: <https://ria.ru/20250217/zemletryasenie-1999739931.html> (дата публикации: 17 февраля 2025).

² Rheinmetall не считает взрыв на заводе в Испании терактом // РИА НОВОСТИ. URL: <https://ria.ru/20250217/zemletryasenie-1999739931.html> (дата публикации: 31 января 2025).

³ СП 88.13330.2014. Свод правил. Защитные сооружения гражданской обороны. Актуализированная редакция СНиП II-11-77* (утв. Приказом Минстроя России от 18.02.2014 № 59/пр) (ред. от 23.01.2019).

ченко, А.Я. Корольченко, А.Н. Бирюков, Ю.А. Бирюков, Е.В. Гвоздев, К.В. Фролов, Н.А. Махутов, Н.Л. Кучин, В.Н. Клочков, Ю.Г. Матвиенко, Е.В. Кловач, С.Н. Буйновский, В.И. Сидоров, А.С. Печеркин, А.И. Гражданкин, М.В. Лисанов, Н.Г. Топольский, Н.А. Акимов, А.Н. Баратов, Н. Kumamoto, E. Henley, R. Billinton, S. Ghosh, A. Zaboli, J. Hong, J. Kwon, T. Vjerga, T. Aven, E.V. Zio и др. Однако вопросы оценки последствий взрывного воздействия на опасных производственных объектах (ОПО), определяемых законом № 116-ФЗ⁴, влияние взрывных нагрузок на здания и сооружения, а также проведение аварийно-восстановительных работ после такого воздействия исследованы недостаточно.

Актуальность аналитического исследования объясняется тем обстоятельством, что к настоящему времени характер и последствия взрывного воздействия на здания и защитные сооружения исследованы недостаточно и требуют дополнительного анализа и уточнения особенностей проведения аварийно-восстановительных работ.

Целью исследования является аналитический обзор взрывного воздействия на здания, защитные сооружения гражданской обороны и их входы (выходы), с обоснованием возможности использования входов для эвакуации людей из защитных сооружений после взрывного воздействия.

Задачи исследования:

- анализ воздействия воздушной ударной волны (ВУВ) на строительные конструкции наземных

⁴ О промышленной безопасности опасных производственных объектов : Федеральный закон от 21.07.1997 № 116-ФЗ (с изменениями от 08.08.2024 г.) // Гарант. URL: <https://base.garant.ru/11900785> (дата обращения: 26 апреля 2025).

и подземных эксплуатируемых объектов капитального строительства (ОКС);

- аналитический обзор степеней повреждения наземных зданий и возможности эвакуации людей из защищенных сооружений;
- обоснование основных этапов аварийно-восстановительных работ.

Теоретические основы

В общем виде понятие и виды взрывов представлены на рис. 1. Анализируя реальные обстоятельства и источники взрывного воздействия на строительные конструкции объектов капитального строительства ОКС, следует исходить из потенциальной опасности не только в связи с техногенными авариями на потенциально опасном объекте (ПОО) от: взрывчатых веществ, сжиженного газа, горючих веществ, элементов потенциально опасных производственных объектов [5], но и от иных устройств различного типа (табл. 1). За основу данных таблицы приняты материалы Руководства... РБ Г-05-039-96⁵, дополненные автором. Кроме того, следует учитывать потенциальную возможность детонации взрывчатых веществ в составе боеприпасов различного типа (табл. 2)^{6, 7}.

⁵ РБ Г-05-039-96. Руководство по анализу опасности аварийных взрывов и определению параметров их механического действия. М. : Росатомнадзор, 2000. С. 29.

⁶ Об использовании атомной энергии : Федеральный закон от 21.11.1995 № 170-ФЗ (ред. от 26.12.2024).

⁷ Об утверждении перечня предприятий и организаций, в состав которых входят особо радиационно-опасные и ядерно-опасные производства и объекты, осуществляющие разработку, производство, эксплуатацию, хранение, транспортировку, утилизацию ядерного оружия, компонентов ядерного оружия, радиационно-опасных материалов и изделий : Постановление Правительства РФ от 7 марта 1995 г. № 238.

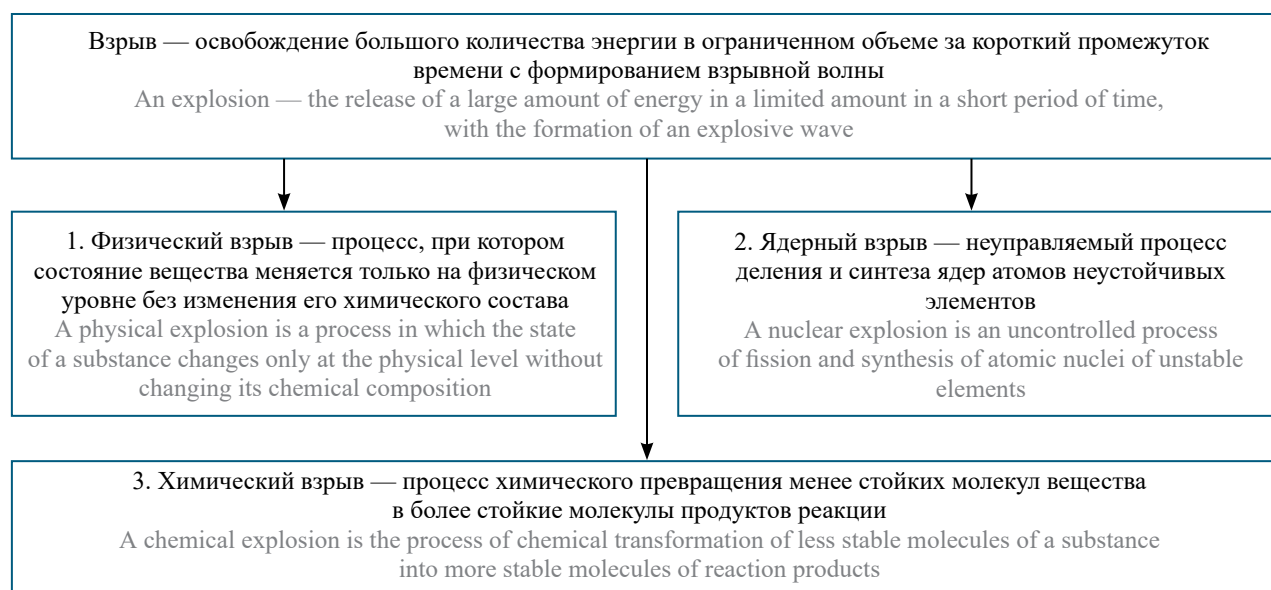


Рис. 1. Виды взрывов с учетом воздействия на строительные конструкции объектов

Fig. 1. Types of explosions, taking into account the impact on building structures of objects

Таблица 1. Перечень потенциальных источников аварийных взрывов на производственных и гражданских объектах⁴
Table 1. List of potential sources of emergency explosions at industrial and civil facilities⁴

Идентификационный признак Identification feature	Наименование объекта опасности Name of the danger object	Определяемые технические характеристики Defined technical characteristics	Рекомендуемая расчетная модель Recommended calculation model
Взрывчатое вещество. Обычное взрывчатое вещество (ВВ), обычные боеприпасы (ОБ), ядерное устройство (ЯУ)* — реактор, установка, заряд ^{6,7} An explosive substance. Conventional explosive, conventional ammunition, nuclear device* — reactor, installation, charge ^{6,7}	В процессе хранения — склады, хранилища. При перевозке — емкости, упаковка, транспортные средства. При исследовании, испытании, переработке, производстве — места их размещения In the process of storage-warehouses, storages During transportation — containers, packaging, vehicles. During research, testing, processing, and production — their locations	Место взрыва и расстояние до расчетной точки. Масса, структура и геометрические параметры. Вид ВВ и его эквивалент The location of the explosion and the distance to the calculated point. Mass, structure, and geometric parameters. Type of explosive and its equivalent	Детонация Detonation
Энергоносители в резервуарах Energy carriers in reservoirs	Цистерны, емкости, баллоны, ресиверы Tanks, tanks, cylinders, receivers	Избыточное давление в резервуаре. Тип вещества. Физико-химические характеристики детонации Excessive pressure in the tank The type of substance. Physico-chemical characteristics of detonation	Дефлаграция, детонация, разрушение стенок резервуара Deflagration, detonation, and destruction of tank walls
Расходуемые энергоносители Consumable energy resources	Машины и механизмы на газовых смесях. Дизельные, котельные, водородные станции Machines and mechanisms powered by gas mixtures. Diesel, boiler, and hydrogen stations	Тип, объем, физико-химические характеристики энергоносителя. Параметры внутреннего объема Type, volume, physico-chemical characteristics of the energy carrier. Internal volume parameters	Дефлаграция или детонация Deflagration or detonation
Сосуды высокого давления High-pressure vessels	Баллоны со сжатыми инертными газами (воздух, пропан, бутан, азот, аргон, гелий и т.д.) Cylinders with compressed inert gases (air, propane, butane, nitrogen, argon, helium, etc.)	Параметры сосуда (объем, давление), тип газовой смеси Vessel parameters (volume, pressure), the type of gas mixture	Разрушение резервуаров внутренним давлением Destruction of reservoirs by internal pressure

Примечание: * — дополнено автором.

Note: * — added by the author.

Анализ существующей информации [6] позволяет прогнозировать, что из имеющихся видов взрывчатых веществ (ВВ) (инициирующих, метательных и бризантных) наибольшую опасность (при равных объемах) представляют бризантные — повышенной мощности (ТЭН, гексоген, тетрил) и номинальной (тротил, пластит и пикриновая кислота (табл. 2). Могут использоваться и ВВ пониженной мощности (аммонит, динамон, аммонал), которые приведут к существенному повреждению ОКС. Большую степень защиты имеют защитные сооружения гражданской обороны [7, 8].

При этом следует учитывать несомненные преимущества и перспективы применения в промышлен-

ности ядерных устройств, использующих механизмы и реакции «деления, синтеза, деления – синтеза», что кроме высокого эффекта применения создает и высокие риски последствий при авариях [9]. Подтверждением чему являются аварии на Чернобыльской АЭС и АЭС Фукусима-1. Существующие в настоящее время результаты произошедших аварий позволяют утверждать, что, в связи с возможностью влиять на происходящие в устройстве процессы, вероятность мгновенного высвобождения энергии, т.е. взрыва, из ядерных устройств (например, реактора) остается невысокой [10].

Указанные в табл. 1 источники взрыва в зависимости от основных факторов, особенно от места

Таблица 2. Перечень взрывчатых веществ в процессе их производства, хранения, транспортировки
Table 2. List of explosives, in the process of their production, storage, transportation

Характеристики взрывчатых веществ Characteristics of explosives			
Тип носителя Media type	Тип взрывчатого вещества Type of explosive	Технические характеристики Technical specifications	Степень разрушения объекта The degree of destruction of the object
<p>Артиллерийский снаряд, мина. Тип: осколочный, фугасный, осколочно-фугасный, касетный, броневой, подкалиберный, кумулятивный, бетонобойный An artillery shell, a mine. Type: fragmentation, high-explosive, high-explosive fragmentation, cluster, armor-piercing, sub-caliber, cumulative, concrete-piercing</p>	<p>Тротил, пикриновая кислота, тетрил, гексоген, порох и т.д. TNT, picric acid, tetryl, hexogen, gunpowder, etc.</p>	<p>Тип взрывчатого вещества. Калибр, мм. Масса снаряда, кг. Масса сердечника, кг. Начальная скорость, м/с. Дульная энергия. Пробиваемость Type of explosives. Caliber, mm. Projectile mass, kg. Core mass, kg. Muzzle velocity, m/s. Muzzle energy. Penetrability</p>	<p>В зависимости от технических характеристик б/п, мощности взрыва и расстояния до места взрыва, конструктивных особенностей здания, наличия преград Depending on the technical characteristics of the second-hand vehicle, the explosion power and the distance to the explosion site, the structural features of the building, and the presence of obstacles</p>
<p>Авиабомба. Тип: фугасная, осколочно-фугасная, осколочная, объемно-детонирующая, проникающая фугасная, бетонобойная, броневая, противотанковая, касетная The aerial bomb. Type: high-explosive, high-explosive fragmentation, fragmentation, volume-detonating, penetrating high-explosive, concrete-piercing, armor-piercing, anti-tank, cluster</p>	<p>Тип взрывчатого вещества: то же, что и п. 1 Type of explosive: the same as paragraph 1</p>	<p>Тип. Длина. Диаметр. Масса. Тип боевой части. Масса боевой части. Масса взрывчатого вещества Type. Length. Diameter. Weight. Type of warhead. The mass of the warhead. Explosive mass</p>	<p>В зависимости от технических характеристик б/п, мощности взрыва и расстояния до места взрыва, конструктивных особенностей здания, наличия преград Depending on the technical characteristics of the second-hand vehicle, the explosion power and the distance to the explosion site, the structural features of the building, and the presence of obstacles</p>
<p>Ракеты. Тип траектории: баллистические, крылатые (дозвуковые, сверхзвуковые, гиперзвуковые) Rockets Trajectory type: ballistic, cruise (subsonic, supersonic, hypersonic)</p>	<p>Тип взрывчатого вещества: нитросоединения (тротил, нитрометан, нитронафталины и т.д.); нитраминны (тетрил, гексоген, октоген, тилен); нитраты спиртов (нитроглицерин, нитроглицоль) и др. Type of explosive: nitro compounds (TNT, nitromethane, nitronaphthalenes, etc.); nitramines (tetryl, hexogen, octogen, thylene); nitrates of alcohols (nitroglycerin, nitroglycol), etc.</p>	<p>Тип траектории полета. Место, направленность запуска. Дальность полета. Тип двигателя. Тип боеголовки. Тип систем управления и наведения Type of flight path. Location, direction of launch. The range. Flying. Engine type. The type of warhead. Type of control and guidance systems</p>	<p>В зависимости от технических характеристик б/п, мощности взрыва и расстояния до места взрыва, конструктивных особенностей здания, наличия преград Depending on the technical characteristics of the second-hand vehicle, the explosion power and the distance to the explosion site, the structural features of the building, and the presence of obstacles</p>

Характеристики взрывчатых веществ Characteristics of explosives			
Тип носителя Media type	Тип взрывчатого вещества Type of explosive	Технические характеристики Technical specifications	Степень разрушения объекта The degree of destruction of the object
Беспилотные летательные аппараты. Тип боеприпасов: осколочные, фугасные, осколочно-фугасные, кумулятивные, термобарические, тандемные Unmanned aerial vehicles Type of portable ammunition: fragmentation, high-explosive, high-explosive fragmentation, cumulative, thermobaric, tandem	Тип взрывчатого вещества, сбрасываемый или встроенный конструктивно The type of explosive that can be dropped or embedded structurally	Тип взрывчатого вещества. Вес. Размер и форма. Скорость, высота полета. Дальность полета. Тип взлета и посадки. Масса дополнительной нагрузки. Система управления Type of explosive. Weight. Size and shape. Speed and altitude of flight. Flight range. The type of takeoff and landing. A lot of additional loads. The management system	В зависимости от технических характеристик б/п, мощности взрыва и расстояния до места взрыва, конструктивных особенностей здания, наличия преград Depending on the technical characteristics of the second-hand vehicle, the explosion power and the distance to the explosion site, the structural features of the building, and the presence of obstacles

расположения источника взрыва, типа взрывчатого вещества, физико-химических параметров детонации, направленности, массы, приведут к различной степени повреждений зданий и сооружений

в результате воздействия ВУВ. При этом ВУВ определяется как область резкого уплотнения воздушной среды, распространяющаяся от центра взрыва со сверхзвуковой скоростью [11].

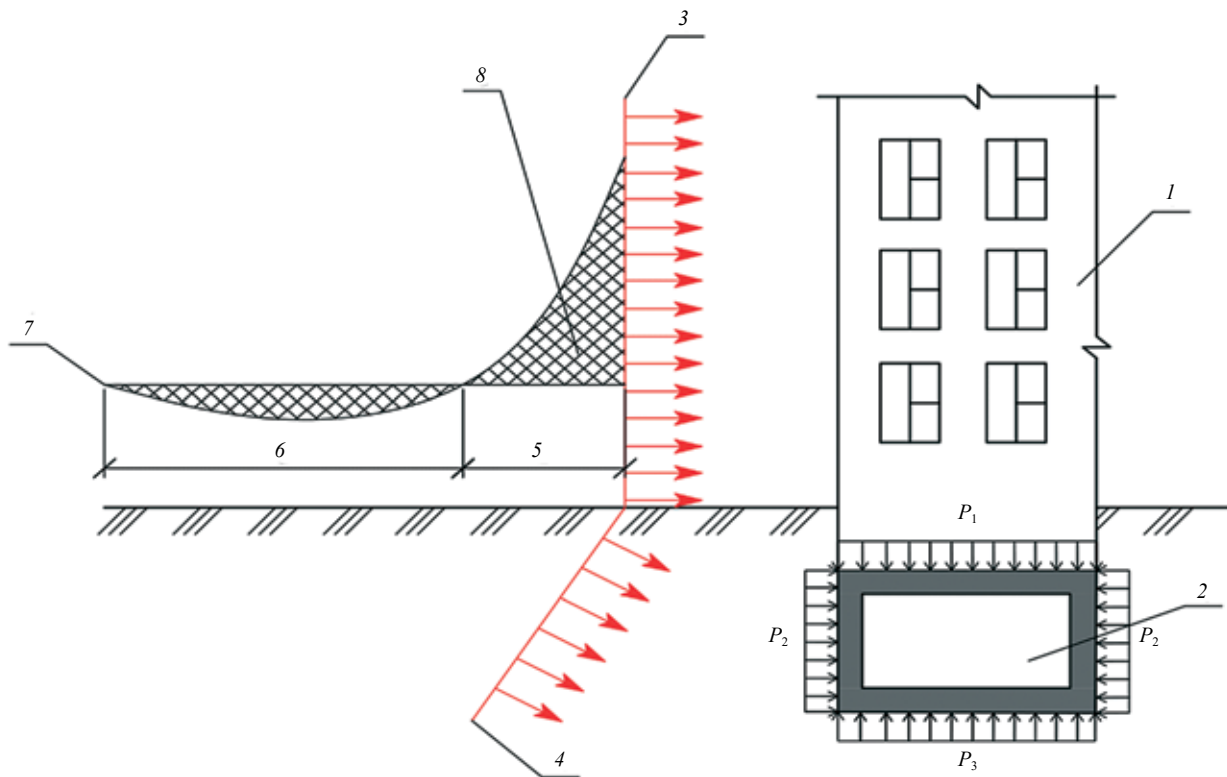


Рис. 2. Расчетная схема воздействия взрывной волны на наземные и подземные объекты: 1 — наземное здание; 2 — подземное сооружение; 3 — фронт воздушной ударной волны (ВУВ); 4 — фронт волны сжатия в грунте; 5 — фаза сжатия во фронте ВУВ; 6 — фаза разряжения за фронтом ВУВ; 7 — атмосферное давление; 8 — импульс ударной волны в фазе сжатия
Fig. 2. Calculation scheme of the impact of an explosive wave on ground and underground facilities: 1 — ground building; 2 — underground structure; 3 — air shock wave front (ASW); 4 — compression wave front in the ground; 5 — compression phase in the ASW front; 6 — discharge phase behind the ASW front; 7 — atmospheric pressure; 8 — the shock wave pulse in the compression phase

Хотя, конечно, для полноты оценки воздействия на строительные конструкции следует предусматривать комплексное воздействие и ВУВ и механическое (осколочное) воздействие взрыва от элементов самого источника взрыва или элементов среды, в которой произошел взрыв.

Результаты и их обсуждение

Расчетная схема оценки последствий взрывного воздействия на ОКС определяется распространением ВУВ в воздушной среде и волн в грунте, воздействующими на ОКС на поверхности земли, а также являющиеся заглубленными или подземными. На рис. 2 показан состав зон формирования, движения и воздействия взрывной волны.

Взрывная волна в процессе распространения образует воздушную ударную волну с ударным импульсом в фазе сжатия, что и принято обозначать фронтом воздушной ударной волны, воздействующей на наземные объекты, а также волну сжатия в грунте, воздействующую на подземные или заглубленные сооружения, что было исследовано в том числе и А.Ю. Савенковым [12–14].

Показанная на рис. 2 схема ВУВ структурно будет состоять из 4 частей: наземной части здания, подземной части здания, грунтового массива и воздушной среды, в которой ВУВ, распространяясь, трансформируется в волну сжатия в грунте, с вариантом подземного сооружения встроенного типа. Однако на практике, в зависимости от заглубленности, они могут быть котлованного, наземно-обсыпного и подземного типов. Хотя следует признать, что наиболее часто ЗСГО являются подземной частью жилого, административного или производственного здания. Очень редкими являются случаи устройства ЗСГО в виде отдельно размещенных сооружений. Волновая картина, представленная на рис. 2, волна сжатия в грунте будет зависеть от давления во фронте волны сжатия, типа грунтов и заглубленности подземного сооружения.

Оценивая характер распространения ВУВ и ее взаимодействия с преградой, следует учитывать характер взрывного воздействия на защитные ограждающие конструкции. И особенно входы (выходы), которые после воздействия ВУВ может заклинить (расклинить), что не позволит их открыть и обеспечить эвакуацию людей. В этой связи более устойчивыми (защищенными) к воздействию ВУВ являются сквозниковые или открытые входы ЗСГО (рис. 3, *b, c, d*) по сравнению с тупиковыми входами (рис. 3, *a* или *e*).

Схема движения ВУВ является сложным процессом. Все виды волн, а также удар и контактный взрыв оказывают на ограждающие конструкции динамическое воздействие, в результате которого

конструктивные элементы находятся в сложном напряженно-деформированном состоянии, а сооружение в целом совершает сложное колебательное движение. Это движение характеризуется следующими кинематическими параметрами:

- перемещениями, скоростями и ускорениями сооружения в направлении трех координатных осей;
- углами, угловыми скоростями и ускорениями поворота сооружения вокруг трех координатных осей.

Величины этих параметров и характер изменения их во времени зависят от многих факторов, основными из которых являются:

- конструктивно-компоновочная форма сооружения, масса, условия посадки и гидрогеология;
- величина и характер динамических нагрузок;
- физико-механические свойства грунта, в котором расположено сооружение [15].

С точки зрения расчета параметров движения многообразии геологических разрезов, в которых располагаются сооружения, можно свести к трем наиболее характерным типам (рис. 4).

1. Мягкий однородный или слоистый грунт. Скальное основание залегает на больших глубинах (400...500 м) и не оказывает влияния на поле напряжений в верхних слоях (рис. 4, *a, b*).

2. Мягкий грунт на скальном основании, залегающем на небольших глубинах (50...150 м), или мягкий грунт с высоким горизонтом грунтовых вод, расположенных на глубине не менее 30 м (рис. 4, *c*).

3. Сплошной скальный массив (рис. 4, *d*).

При расположении сооружений в мощном слое мягкого грунта (п. 1, 2) основное воздействие оказывает воздушная ударная волна и порожденная ею волна сжатия, а в случаях расчета сооружений на давление $\Delta P_{\phi} > 2$ МПа и эпицентральные волны. При неглубоком залегании скального основания (п. 2) или наличии водоносного пласта мощностью более 10 м наряду с волнами сжатия на параметры движения сооружения существенное влияние оказывают сейсмические и отраженные волны [16, 17].

При расположении сооружения в скальных грунтах доминирующее значение приобретают сейсмические волны. Колебания же сооружения от воздушной ударной волны и волны сжатия, в связи с малостью их по сравнению с колебаниями от сейсмических волн, можно не учитывать.

Расчет параметров движения сооружения в строгой постановке, т.е. с учетом объемной деформации грунтовой среды с нелинейной зависимостью $\sigma - \epsilon$ деформации сооружения и его конструктивных элементов, представляет собой сложную математическую модель, которую на практике упрощают до требуемого уровня.

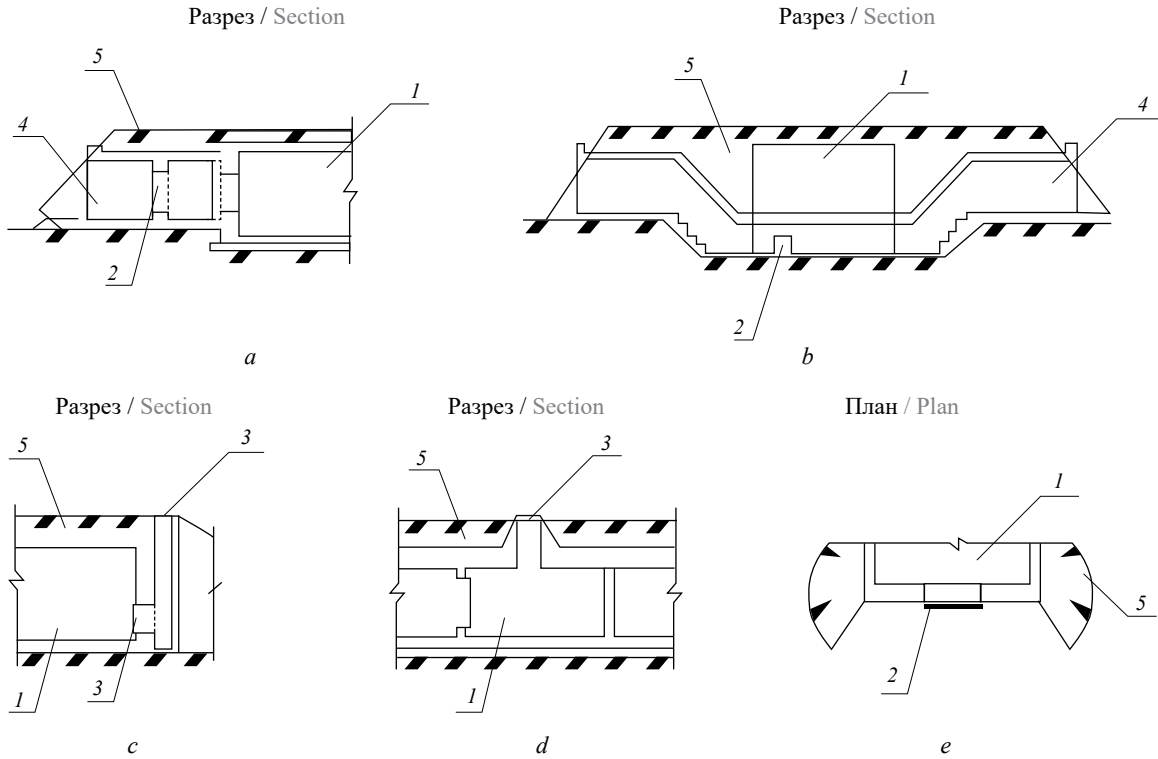


Рис. 3. Типы основных и аварийных входов (выходов) защитных сооружений ГО и ЧС: *a* — тупиковый; *b* — сквозниковый; *c* — шахтный; *d* — вертикальный встроенный; *e* — прямой открытый; 1 — внутренний объем защищенного сооружения; 2 — двери на входах; 3 — люки на аварийных выходах; 4 — входная потерна (подземный коридор); 5 — грунтовая обсыпка над защищенным сооружением

Fig. 3. Types of main and emergency entrances (exits) of civil defense and emergency protection structures: *a* — dead-end; *b* — through; *c* — shaft; *d* — vertical built-in; *e* — direct open; 1 — the internal volume of the protected structure; 2 — doors at the entrances; 3 — hatches at the emergency exits; 4 — entrance tunnel (underground corridor); 5 — soil sprinkling above the protected structure

Важно учитывать местное воздействия взрыва, под которым понимают образование воронки, зон разрушения в грунте, вспучивания, навала грунта и камнепада. При наземных взрывах в грунте образуется воронка взрыва за счет вдавливания его в массив, выдавливания в стороны в радиальном и вертикальном направлениях, а также вследствие выброса части грунта из воронки (рис. 5). Выдавленный и выброшенный из воронки грунт образует зону навала (завала), которая может образоваться и при разрушении здания.

Основными параметрами воронки взрыва являются (рис. 5):

- радиус воронки r_B ;
- глубина воронки h_B ;
- высота навала, выброшенного из воронки грунта, h_H ;
- вертикальное ω_z и горизонтальное ω_x остаточные смещения;
- радиус навала грунта r_H .

Непосредственно за воронкой образуется зона разрушений грунта, в которой грунт пронизан трещинами в основном в радиальном направлении.

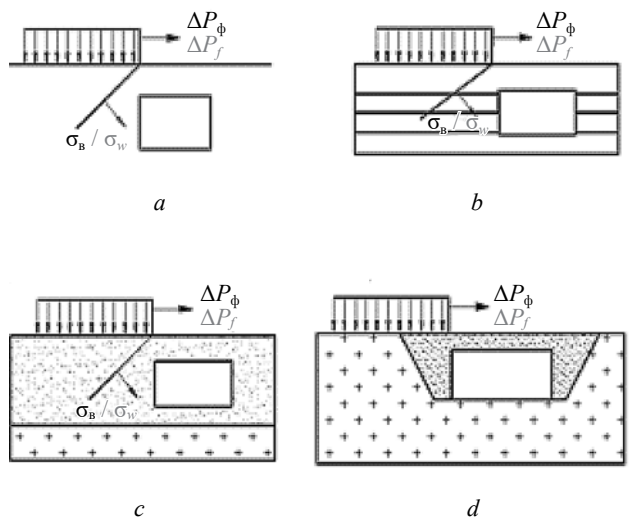


Рис. 4. Основные схемы расположения сооружения в грунте с различными сейсмогеологическими разрезами: *a* — в мягком однородном грунте; *b* — в мягком слоистом грунте; *c* — в мягком грунте, подстилаемом скалой; *d* — в скальном грунте

Fig. 4. Basic diagrams of the structure's location in the ground with various seismogeological sections: *a* — in soft homogeneous soil; *b* — in soft layered soil; *c* — in soft soil underlain by rock; *d* — in rocky soil

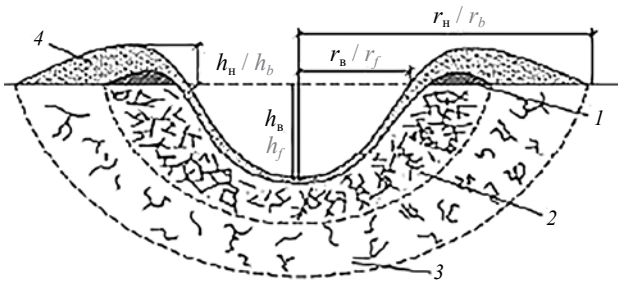


Рис. 5. Профиль воронки взрыва: 1 — выдавленный грунт; 2 — зона разрушения; 3 — зона упруго-пластических деформаций; 4 — навал грунта
Fig. 5. The profile of the explosion funnel: 1 — the extruded soil; 2 — the destruction zone; 3 — zone of elastic-plastic deformations; 4 — bulk of soil

Радиус и глубина воронки наземного ядерного взрыва приведены в табл. 3.

Сейсмозрывные волны в грунтовых массивах [18, 19] при наземных взрывах возникают вследствие концентрированной передачи энергии грунту в районе взрыва или воздействия на грунт воздушной ударной волны. Взрывное воздействие на здания и сооружения в виде местного действия ВУВ и сейсмозрывных волн взрыва может привести к повреждениям наземных и подземных объектов (рис. 6).

Местное действие приводит к тому, что наземные сооружения, а также наземные элементы объектов, находящиеся в грунтовом массиве (например, входы в ЗСГО, оголовки их газовоздушных трактов), могут быть засыпаны навалом грунта воронки взрыва. Вспучивание и растрескивание поверхности грунта могут выводить из строя дороги, взлетно-посадочные полосы аэродромов, кабельные линии, трубопроводы, а также другие объекты. Местность становится труднопроходимой для транспортных средств. Попадание зданий и сооружений в зону воронки приводит к наиболее сильному или полному их разрушению [20–22].

Сейсмозрывные волны, воздействуя на сооружения, находящиеся в массиве грунта, будут вызывать в их конструкциях запредельные нагрузки и усилия, вовлекать все сооружение в колебательное движение, смещая его относительно окружающего грунта, результатом чего являются остаточные относительные смещения (рис. 7, 1). Изгибающие моменты и перерезывающие силы могут приводить к разрушениям конструкций сооружений (рис. 7, 2) [19].

При колебательном движении сооружения возникают ускорения, под действием которых появляются инерционные силы F_ϕ . Эти силы могут быть столь велики, что могут привести к поражению людей, срыву со своих мест и повреждению оборудования и аппаратуры внутри ЗСГО (рис. 7, 3, 4). Оборудование и аппаратура могут выйти из строя и без срыва со своих мест за счет внутренних

Таблица 3. Радиус и глубина воронки наземного ядерного взрыва

Table 3. Radius and depth of a ground-based nuclear explosion crater

Параметр Parameter	Мощность взрыва q , т Explosion power q , t		
	10^4	10^5	10^6
r_b , м r_f , m	30/25	60/50	120/100
h_b , м h_f , m	14/10	25/20	45/36

Примечание. В числителе указано для дисперсных грунтов, в знаменателе — для скальных.

Note. The numerator indicates dispersed soils, and the denominator indicates rocky soils.

повреждений. Травмы у людей могут возникать и за счет потери ими устойчивости при общем перемещении сооружения. Потеряв равновесие, человек может упасть, удариться о находящиеся в помещении предметы и ограждающие конструкции.

Смещение сооружения относительно окружающего грунта может привести к разрушению входов, заклиниванию дверей, обрыву и разрушению подводящих сетей водоснабжения, электроснабжения, связи, канализации и технологических коммуникаций (рис. 7, 5).

Абсолютные смещения, разрушение и развороты сооружения (рис. 8) относительно своего первоначального положения могут привести к повреждениям входов (входных потерн) и невозможности выхода (прохода) людей.

Конкретное значение напряжения на определенном удалении от центра взрыва зависит от мощности взрыва, расстояния до взрыва и свойств грунтового массива, важнейшими из которых являются плотность грунта и скорости распространения упругих и упругопластических волн.

Как и следует из схем на рис. 2 и рис. 8 [12], при соответствующих значениях избыточного давления ΔP_ϕ во фронте ВУВ (табл. 4, столбец 4) будут силь-

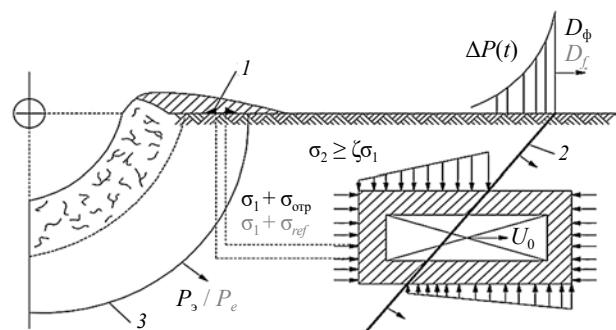


Рис. 6. Схема воздействия на сооружение местного действия взрыва и сейсмозрывных волн: 1 — оголовок входа (газовоздушного тракта); 2 — волна сжатия; 3 — эпицентральная волна
Fig. 6. Scheme of the impact of a local explosion and seismic waves on the structure: 1 — the head of the entrance (gas-air path); 2 — compression wave; 3 — epicentral wave

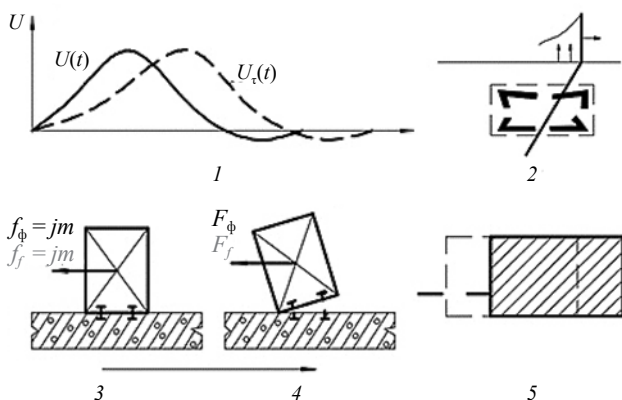


Рис. 7. Сейсмозрывное воздействие на подземные сооружения и возможные последствия
Fig. 7. Seismic and explosive effects on underground structures and possible consequences

ные разрушения, т.е. (табл. 5, столбец 4) сплошные разрушения несущих конструкций наземных зданий и подземных сооружений.

При сильных разрушениях могут сохраняться наиболее прочные элементы здания и сооружения: элементы каркасов, ядра жесткости, частично стены и перекрытия нижних этажей, но за счет менее прочных конструкций и узлов образуются завалы. Для производственных зданий это наступает при ΔP_ϕ во фронте ВУВ = 65–95 кПа (табл. 4, столбец 4). Для надземной части «жилых и административных» при ΔP_ϕ = 20–80 кПа. Для подвалов сильные разрушения наступят от ΔP_ϕ = 160 кПа.

Самой высокой степенью защищенности обладают защитные сооружения (табл. 4, столбец 3), где сильные разрушения наступают в интервале значений ΔP_ϕ = 160–1200 кПа. Причем надо понимать, что разрушения наступают не сразу после воздействия фронта ВУВ на ЗСГО, а после прохождения всего цикла фаз «сжатия – разряжения». Кроме того, следует понимать, что в случае воздействия ВУВ с ΔP_ϕ превышающими значениями для степени разрушения «сильная» наступает еще более критичное техническое состояние сооружения со степенью разрушения «полная» (табл. 5, столбец 4), которая

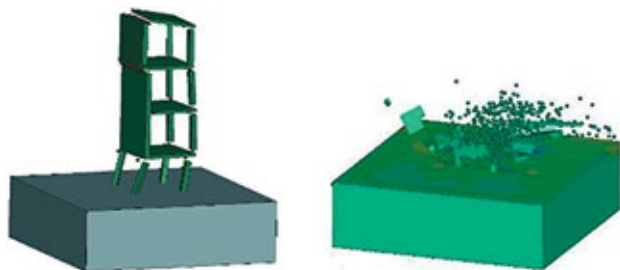


Рис. 8. Поэлементная расчетная динамическая модель цикла «обрушение здания – образование завала над защитным сооружением»
Fig. 8. Piecewise computational dynamic model of the cycle “building collapse – blockage formation on a protective structure”

характеризуется обрушением здания и сооружения с образованием завалов, с сохранением только незначительной части прочных элементов.

Таким образом, гарантировано при сильных и полных разрушениях в случае со связанными в единую систему «надземная часть здания – ЗСГО» заглубленное сооружение под завалом в связи с обрушением на него строительных конструкций. При этом, чем больше площадь застройки и высота здания, масштабы завалов будут ощутимее.

Сценарные варианты повреждений и оценка технического состояния строительных ограждающих конструкций зданий после взрывного воздействия приведены в табл. 6. Укрупненно их можно сформировать в 5 групп. Первые четыре после воздействия обычных средств поражения на основания и фундаменты, перекрытия, стены, кровлю, и пятая группа — как результат воздействия ВУВ после взрыва ядерного заряда.

В качестве нормативного оценочного источника, определяющего категорию технического состояния, принят ГОСТ 31937–2024⁸, в соответствии с которым ключевыми характеристиками являются: 1-я категория — нормативное (дефекты отсутствуют, все параметры строительных конструкций соответствуют требованиям); 2-я категория — работоспособное (дефекты имеются, но несущая способность обеспечена); 3-я категория — ограниченно-работоспособное (снижена несущая способность грунтов и конструкций, опасности обрушения нет); 4-я категория — аварийное (дефекты значительны, несущая способность исчерпана, опасность обрушения). В табл. 6 оценочные категории технического состояния приведены в столбце 5.

Планируя общие мероприятия защиты от взрывного воздействия на заглубленные и подземные защитные сооружения ГО, эффективными следует считать [5, 11, 19]:

- амортизация всего внутреннего объема сооружения (общая амортизация) либо отдельных его частей или отдельного, наиболее чувствительного к ускорениям оборудования и аппаратуры (местная амортизация);
- рассредоточение сооружений и объектов для исключения их взаимного поражения;
- заглубление сооружений в грунт;
- выбор соответствующих геологических условий посадки сооружения, обеспечивающих наибольшее затухание тех параметров сейсмозрывных волн, к которым сооружение наиболее чувствительно;
- проектирование и строительство ограждающих конструкций сооружений, способных выдерживать расчетные воздействия сейсмозрывных волн, не разрушаясь;

Таблица 4. Степени разрушения ОКС при различных значениях избыточного давления во фронте, кПа⁸
Table 4. Degrees of destruction of the CCF at different values of overpressure in the front of the, kPa⁸

Типы зданий Types of buildings	Степени разрушения объекта при различных значениях ΔP_f , кПа The degree of destruction of the object at different values of ΔP_f , kPa		
	Слабая Weak	Средняя Average	Сильная Strong
1	2	3	4
<i>1. Промышленные здания Industrial buildings</i>			
Промышленное с металлическим или железобетонным каркасом Industrial with metal or reinforced concrete frame	32–65	65–80	80–95
Промышленное с металлическим каркасом и крановым оборудованием Industrial with metal frame and crane equipment	32–48	48–65	65–80
<i>2. Жилые и административные здания Residential and administrative buildings</i>			
Кирпичное многоэтажное Brick multi-storey building	12–20	20–32	32–48
Кирпичное одно- и двухэтажное One- and two-story brick buildings	12–24	24–40	40–56
<i>3. Защитные сооружения Protective structures</i>			
Убежище отдельно стоящее, рассчитанное на: The shelter is free-standing, designed for:	–	–	–
350 кПа (3,5 кгс/см ²) 350 kPa (3.5 kgf/cm ²)	640–960	960–1200	1200
100 кПа (1 кгс/см ²) 100 kPa (1 kgf/cm ²)	160–240	240–320	320
Убежище встроенное, рассчитанное на: The shelter is built-in, designed for:	–	–	–
100 кПа (1 кгс/см ²) 100 kPa (1 kgf/cm ²)	110–160	160–240	240
50 кПа (0,5 кгс/см ²) 50 kPa (0.5 kgf/cm ²)	48–65	65–160	160

- увеличение стойкости внутреннего оборудования и аппаратуры к воздействию ускорений;
- устройство гибких вводов и компенсаторов на подходящих коммуникациях;
- дублирование отдельных элементов сооружения.

Необходимо отметить, что только комплексное проведение всех мероприятий защиты позволяет строить сооружения, отвечающие предъявляемым к ним требованиям.

⁸ ГОСТ 31937–2024. Здания и сооружения. Правила обследования и мониторинга технического состояния.

Проведенный анализ (табл. 4–6) позволяет отметить, что степень повреждения ОКС для всех видов источников взрыва и боеприпасов (в обычном и в ядерном исполнении) определяется техническими характеристиками б/п, мощностью взрыва, расстоянием до места взрыва, местоположением взрыва (наземный, подземный, воздушный), конструктивных особенностей здания и наличием преград (экранов).

При этом, исходя из потенциальной возможности повреждения зданий и сооружений, далее предлагается методика планирования аварийно-восстановительных работ (АВР) и их ресурсного обеспечения на поврежденном объекте. Эффективность

Таблица 5. Характеристика степеней разрушения зданий от действия воздушной ударной волны⁹
Table 5. Characteristics of the degrees of destruction of buildings from the action of an air shock wave⁹

Степень разрушения Degree of destruction			
Слабая Weak	Средняя Average	Сильная Strong	Полная Full
1	2	3	4
<p>Разрушение внутренних перегородок, кровли, дверных и оконных коробок, легких пристроек и др. Основные несущие конструкции сохраняются</p> <p>Destruction of internal partitions, roofs, door and window frames, light outbuildings, etc. The main supporting structures are preserved</p>	<p>Снижение эксплуатационной пригодности зданий. Несущие конструкции сохраняются, но частично деформируются. Снижается несущая способность конструкций. Обрушений нет</p> <p>Reducing the operational suitability of buildings. The supporting structures are preserved, but partially deformed. The bearing capacity of structures is reduced. There are no collapses</p>	<p>Сплошное разрушение несущих конструкций. Могут сохраняться наиболее прочные элементы: элементы каркасов, ядра жесткости, частично стены и перекрытия нижних этажей. При сильном разрушении образуется завал</p> <p>The continuous destruction of load-bearing structures. The most durable elements can be preserved: elements of frames, cores of rigidity, partially walls and floors of the lower floors. In case of severe destruction, a blockage is formed</p>	<p>Обрушение зданий. Могут сохраниться только поврежденные (или неповрежденные) подвалы, а также незначительная часть прочных элементов. Образуются завалы</p> <p>The collapse of buildings. Only damaged (or undamaged) basements can be preserved, as well as a small part of the durable elements. Blockages are forming</p>

АВР и их ресурсное обеспечение являются взаимосвязанными и важными элементами обеспечения организационно-технологической надежности (ОТН) восстановления, так как прямо влияют на сроки, затраты и качество работ [23]. Блок-схема указанного представлена на рис. 9.

Базовым элементом системы планирования ресурсов является уточнение агрегированных параметров производственных процессов: трудоемкости, выработки, расхода ресурсов, себестоимости и стоимости работ, по сформированным базовым конструктивно-технологическим решениям восстановления объекта [24].

Аналитическое решение задачи определения потребностей в восстановительных объектах позволяет определить и оптимизировать параметры производственных процессов в агрегированном виде.

При расчете обеспечения средств механизации восстановительных работ использована статистическая модель ресурсного обеспечения [25]. С учетом этого стационарные, ординарные потоки с ограниченным последствием однозначно определяются функцией плотности вероятностей.

При этом интервал времени t_i между поступлением $(i - 1)$ и i заявки, то при $i \geq 2$ все t_i распределены одинаково с функцией плотности вероятностей $f(t)$. Плотность вероятностей случайной

величины t_i (момента поступления первой заявки) возможно определить по формуле (1):

$$f_i(Z) = \lambda[1 - F(Z)], \tag{1}$$

где λ — интенсивность потока заявок на ресурсы;

$$F(Z) = \int_0^Z f(t) dt \text{ — функция распределения интервалов между заявками.}$$

Входящий поток требований целесообразно задать в виде интегральной функции распределения интервалов между поступлением двух последовательных ресурсных заявок:

$$F(t_i) = P(t_i \leq Z) = \begin{cases} \int_0^Z f(\omega) d\omega & \text{при } i \geq 2 \\ \int_0^Z f_1(\omega) d\omega & \text{при } i = 1 \end{cases} . \tag{2}$$

Исходя из вышеприведенного целесообразно вероятностную характеристику системы ресурсного обеспечения представить в виде системы функционирования обслуживаемых объектов с учетом единиц расхода ресурсов и задать функцией распределения длительности обслуживания объектов поставки ресурсов $\Phi(t_{\text{обсл}}) = P(t_{\text{обсл}} \leq x)$.




В величину времени обслуживания в условиях АВР целесообразно включать все затраты материальных, финансовых и временных ресурсов, связанных с потерями из-за нарушения эффективности АВР ввиду ограниченности времени на качественную

Таблица 6. Варианты и оценка сценарных повреждений строительных конструкций зданий от взрывного воздействия
Table 6. Variants of damage to building structures from explosive effects

Шифр дефекта The cipher of the defect	Вид повреждения Type of damage	Фотофиксация сценарного повреждения Photofixation of scenario damage	Оценочная категория технического состояния объекта (ГОСТ 31937–2024) ⁸ Estimated category of the technical condition of the facility (GOST 31937–2024) ⁸
2	3	4	5
1.1	<p>Зоны повреждения для скальных пород: воронки; смятия; трещинообразования; микротрещины Damage zones for rock formations: funnels; crumpling; cracking; microcracks</p>		<p>Для оснований категория не предусмотрена There is no category for grounds</p>
1.2	<p>Зоны повреждения для грунтовых пород: воронки; выдавливания; разрушения; упруго пластические деформации; навал Damage zones for ground rocks: funnels; extrusions; destruction; elastic plastic deformations; bulk</p>		<p>Для оснований категория не предусмотрена There is no category for grounds</p>
1.3	<p>Одновременное повреждение основания и здания Simultaneous damage to the foundation and building</p>		<p>Для фундаментов 3, 4 For foundations 3, 4</p>
1.4	<p>Возможные дефекты фундаментов при отсутствии прямого воздействия на фундамент, но воздействии на грунтовое основание: разрушение; повреждение Possible defects of the foundations in the absence of direct impact on the foundation, but impact on the ground foundation: destruction; damage</p>		4
1.5	<p>Разрушение или повреждение фундамента при прямом воздействии Destruction or damage of the foundation by direct impact</p>		4

Шифр дефекта The cipher of the defect	Вид повреждения Type of damage	Фотофиксация сценарного повреждения Photofixation of scenario damage	Оценочная категория технического состояния объекта (ГОСТ 31937–2024) ⁸ Estimated category of the technical condition of the facility (GOST 31937–2024) ⁸
2	3	4	5
2.1	Локальное повреждение Local damage		4
2.2	Разрушение Destruction		4
3.1	Повреждение стен и оконных конструкций от взрывной волны Damage to walls and window structures from the blast wave		2–3
3.2	Повреждение стен продуктами взрыва Damage to the walls by explosion products		2–3
3.3	Местное повреждение стен из мелкогазобетонных элементов (взрывное воздействие снаружи) Local damage to walls made of small-sized elements (explosive impact from the outside)		3–4
3.4	Местное повреждение стен здания из мелкогазобетонных элементов (взрывное воздействие внутри) Local damage to the walls of a building made of small-sized elements (explosive impact inside)		3–4
3.5	Повреждение стен панельного здания (воздействие внутри) Damage to the walls of a panel building (impact inside)		3–4

Шифр дефекта The cipher of the defect	Вид повреждения Type of damage	Фотофиксация сценарного повреждения Photofixation of scenario damage	Оценочная категория технического состояния объекта (ГОСТ 31937–2024) ⁸ Estimated category of the technical condition of the facility (GOST 31937–2024) ⁸
2	3	4	5
3.6	Повреждение стен панельного здания (воздействие снаружи) Damage to the walls of a panel building (external impact)		3–4
3.7	Разрушение части здания (секции, блока) Damage to the walls of a panel building (external impact)		4
3.8	Полное разрушение здания при внешнем взрывном воздействии Complete destruction of the building due to external explosive impact		Здание разрушено, требуется снос и вывоз строительного мусора The building is destroyed, requires demolition and removal of construction debris
3.9	Полное разрушение здания при размещении источника взрыва внутри здания Complete destruction of the building when the source of the explosion is located inside the building		Здание разрушено, требуется снос и вывоз строительного мусора The building is destroyed, requires demolition and removal of construction debris
3.10	Полное разрушение комплекса зданий Complete destruction of the building complex		Здания разрушены, требуется снос и вывоз строительного мусора The building is destroyed, requires demolition and removal of construction debris

Шифр дефекта The cipher of the defect	Вид повреждения Type of damage	Фотофиксация сценарного повреждения Photofixation of scenario damage	Оценочная категория технического состояния объекта (ГОСТ 31937–2024) ⁸ Estimated category of the technical condition of the facility (GOST 31937–2024) ⁸
2	3	4	5
4.1	Повреждение или разрушение кровли Roof damage or destruction		4
4.2	Комбинированное повреждение кровли и стен Combined damage to the roof and walls		4
5.1	Повреждение или разрушение объекта после взрыва ядерного заряда в зависимости от мощности и расстояния до взрыва Damage or destruction of an object after the explosion of a nuclear charge, depending on the power and distance to the explosion		3, 4 или разрушено 3, 4 or destroyed

проработку и обоснование всех организационно-технологических решений (ОТР), возможными логистическими проблемами ввиду только сформированных каналов поставки, в ряде случаев экстремальных природно-климатических условий, непредвиденных и некоторых других организационно-технологических и технических причин.

Планирование средств механизации (СМ) следует предусматривать исходя из необходимости требуемого ремонта и профилактического обслуживания в соответствии с регламентами и заданными графиками для каждого СМ после окончания восстановления очередного объекта и нахождения в ремонте некоторое время $t_{рем}$, характеризующегося функцией распределения $G(t_{рем}) = P(t_{рем} \leq y)$ до начала работ на следующем объекте [26].

В условиях отсутствия необходимых средств механизации и ожидания на объекте СМ некоторое время $t_{ож}$ длительность ожидания будет величиной случайной со своей функцией распределения:

$$H(t_{ож}) = P(t_{ож} \leq \omega). \tag{3}$$

В такой ситуации необеспеченности СМ следует предусмотреть динамическую корректировку составленного ранее плана работ и выполнить резервные работы. Таким образом, моделируя систему массового обслуживания, в условиях рисков, следует формировать случайные интервальные величины между поступлениями заявок от объектов, определять длительности обслуживания объектов и простоя средств механизации в ремонте или непоступления ресурсов, что отражается заданным законом распределения $F(x)$, заключающимся в получении значения x из уравнения:

$$x = F^{-1}(\xi), \tag{4}$$

где $F^{-1}(\xi)$ — функция, обратная $F(x)$; ξ — случайное число из совокупности с равномерным распределением в интервале $(0 \dots 1)$.

Таким образом, в таких экстремальных условиях оптимальным решением эффективности выполне-

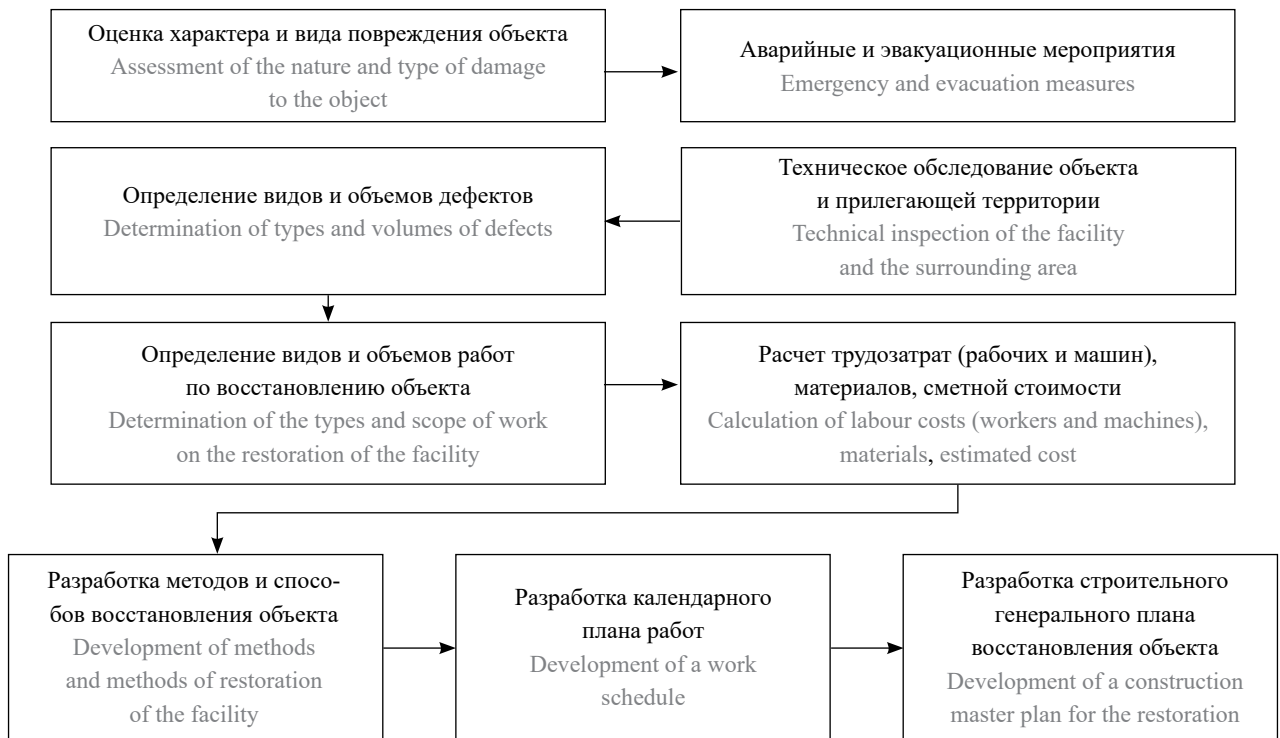


Рис. 9. Блок-схема методики планирования аварийно-восстановительных работ и их ресурсного обеспечения
Fig. 9. Flowchart of the methodology for planning emergency recovery operations and their resource provision

ния работ может стать применение динамической, детерминированной модели планирования работ и их ресурсного обеспечения.

Выводы

Проведенное исследование позволяет отметить следующее.

1. Степень повреждения ОКС для всех видов и источников взрыва определяется техническими характеристиками взрывчатого вещества, мощностью взрыва, расстоянием до места взрыва, местоположением взрыва (наземный, подземный, воздушный), конструктивными особенностями зданий и сооружений, наличием преград (экранов).

2. Гарантировано будут разрушены наземные объекты независимо от их сейсмостойкости: жилые и административные здания при значениях избыточного давления во фронте ВУВ 32–80 кПа, а производственные здания при значениях 65–95 кПа. В этом случае будут образованы сильные разрушения и здания будут в категории технического состояния — аварийное, вследствие чего проведение аварийно- и ремонтно-восстановительных работ делается технически и экономически нецелесообразным.

3. Следует предусматривать опасные условия воздействия на ОКС ударной волны. Оценка состояния входов после воздействия ВУВ дает основание считать, что есть опасность расклинивания (заклинивания) дверей входов (выходов)

из сооружений. В этой связи более опасным является направление прямого волнового воздействия на конструкции входов ЗСГО. Наибольшую степень защищенности при воздействии ВУВ будут иметь сквозниковые входы, в отличие от тупиковых, шахтных и прямых открытых. В этой связи при проектировании входов наиболее целесообразными вариантами являются сквозниковые, что повысит живучесть и эвакуационные параметры сооружения, минимизирует опасность расклинивания дверей.

4. В случае если ЗСГО является подземной частью наземного здания, то при разрушении наземной части взрывом существует высокая вероятность, что эвакуировать людей из ЗСГО не представится возможным в связи с образованием завалов и заклиниванием дверей. В этом случае потребуются аварийно-восстановительные работы для расчистки эвакуационных путей и восстановления входов (выходов) для прохода людей.

5. Особые условия аварийно-восстановительных работ, ввиду ограниченности времени, возможных рисков обрушений, необходимости эвакуационных работ, новизны логистических схем обеспечения всеми видами ресурсов и некоторыми другими проблемами, логично предполагают использование динамической, детерминированной моделей планирования работ и их ресурсного обеспечения.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. *Болодьян И.А., Возман Л.П., Корольченко Д.А.* Экспериментально-аналитические исследования пожарной опасности материалов, применяемых в оборудовании с обогащенными кислородом средами при повышенных давлениях, и пути снижения их горючести // *Пожаровзрывобезопасность/Fire and Explosion Safety*. 2023. № 32 (3). С. 17–30. DOI: 10.22227/0869-7493.2023.32.03.17-30. EDN FOZJMS.
2. *Орлов Г.Г., Корольченко Д.А., Корольченко А.Я.* Определение величины и характера взрывных нагрузок при применении инерционных предохранительных конструкций // *Пожаровзрывобезопасность/Fire and Explosion Safety*. 2015. № 24 (4). С. 47–55. EDN TVFFSB.
3. *Stroykov G.A., Babyr N.V., Ilin I.V., Marchenko R.S.* System of comprehensive assessment of project risks in energy industry // *International Journal of Engineering, Transaction A: Basics*. 2021. No. 34 (7). DOI: 10.5829/IJE.2021.34.07A.22. EDN DZMCQN.
4. *Srikrishnan V., Lafferty D.C., Wong T.E., Lamontagne J.R., Quinn J.D., Sharma S. et al.* Uncertainty Analysis in Multi-Sector Systems: Considerations for Risk Analysis, Projection, and Planning for Complex Systems // *Earth's Future*. 2022. № 10 (8). DOI: 10.1029/2021EF002644. EDN CJZDWL.
5. *Арефьева Е.В., Баринов А.В., Бобарико А.В., Борейко В.Я., Виноградов О.В.* Защита в чрезвычайных ситуациях // МЧС России. Изд. 2-е перераб. М. : АГЗ МЧС России, 2018. 400 с. URL: https://rusneb.ru/catalog/000199_000009_009934396/
6. *Боеприпасы : уч., в 2 т. / под общ. ред. В.В. Селиванова.* 3-е изд. М. : Издательство МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2019. 346 с.
7. *Котляревский В.А.* Прочность и защитные свойства специальных сооружений: методы расчета и программные средства. Магнитогорск : ООО «ВЕЛД», 2014. 86 с. URL: https://rusneb.ru/catalog/000199_000009_007871487/
8. *Мишуев А.В.* Воздушная ударная волна в сооружениях. М. : Библиотека научных разработок и проектов НИУ МГСУ, 2015. 408 с. EDN XCXUIX.
9. *Baloshin Yu.A., Zarichnyak Yu.P., Uspenskaya M.V.* Physical foundations of nuclear energy : textbook. Part II. St. Petersburg : ITMO University, 2015. 88 p.
10. *Бейкер У., Кокс П., Уэстайн П., Кулеш Д., Стрелов Р.* Взрывные явления. Оценка последствий. В 2-х кн. Кн. 2 / пер. с англ. под ред. Я.Б. Зельдовича, Б.Е. Гельфанда. М. : Мир, 1986. 382 с. URL: https://rusneb.ru/catalog/000200_000018_rc_621191/
11. *Мкртычев О.В.* Безопасность зданий и сооружений при сейсмических и аварийных воздействиях : монография. М. : МГСУ, 2010. 152 с. EDN RXGPIZ.
12. *Савенков А.Ю.* Расчет подземных железобетонных сооружений на аварийные воздействия в нелинейной динамической постановке : дис. ... канд. техн. наук. М. : МГСУ, 2023. 143 с. EDN WPWNCH.
13. *Комаров А.А., Громов Н.В., Корольченко А.Д.* Использование сетчатых экранов для защиты промышленных объектов от беспилотных летательных аппаратов // *Безопасность труда в промышленности*. 2025. № 1. С. 76–82. DOI: 10.24000/0409-2961-2025-1-76-82. EDN FQFAKL.
14. *Ramalho F.D., Silva I.S., Ekel P.Y., Martins C.A.P. da S., Bernardes P., Libório M.P.* Multimethod to prioritize projects evaluated in different formats // *MethodsX*. 2021. No. 8. P. 101371. DOI: 10.1016/j.mex.2021.101371. EDN BJGJAK.
15. *Podolchak N., Tsygulyk N., Dziurakh Y.* Building an effective personnel risks management system of the organization // *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*. 2022. No. 4 (13–118). Pp. 44–52. DOI: 10.15587/1729-4061.2022.262547. EDN AAOUFS.
16. *Niazi M.A.* Introduction to the modeling and analysis of complex systems : a review // *Complex Adaptive Systems Modeling*. 2016. No. 4 (1). Pp. 1–3. DOI: 10.1186/s40294-016-0015-x. EDN ANLFGU.
17. *Mbuli N., Mathonsi M., Seitshiro M., Pretorius Ja.H.C.* Decomposition forecasting methods : a review of applications in power systems // *Energy Reports*. 2020. No. 6. Pp. 298–306. DOI: 10.1016/j.egy.2020.11.238. EDN WKEWFM.
18. *Ластовкин В.Ф., Козлов А.П., Забелин В.А.* Защитные сооружения гражданской обороны. Нижний Новгород : ННГАСУ, 2020. 79 с. URL: https://bibl.nngasu.ru/electronicresources/uch-metod/health_safety/873922.pdf
19. *Руденко А.А.* Организационно-технологические и конструктивные решения по восстановлению, ремонту, усилению и замене поврежденных элементов зданий : монография. Курск : Университетская книга, 2025. 74 с. EDN QPBWEW.
20. *Hernández-Orozco S., Zenil H., Riedel J., Uccello A., Kiani N.A., Tegnér J.* Algorithmic Probability-Guided Machine Learning on Non-Differentiable Spaces // *Frontiers in Artificial Intelligence*. 2021. No. 3. P. 20. DOI: 10.3389/frai.2020.567356. EDN BSPNPV.
21. *Ghosh S., Zaboli A., Hong Ju., Kwon Ja.* An Integrated Approach of Threat Analysis for Autonomous Vehicles Perception System // *IEEE Access*. 2023. No. 11. Pp. 14752–14777. DOI: 10.1109/ACCESS.2023.3243906. EDN UPQVKP.

22. Мухно Е.П. Ликвидация последствий аварий и стихийных бедствий. М. : Атомиздат, 1989. 287 с. URL: <https://search.rsl.ru/ru/record/01007653694>
23. Dvulit P., Savchuk S., Sosonka I. Accuracy estimation of site coordinates derived from GNSS-observations by non-classical error theory of measurements // *Geodesy and Geodynamics*. 2021. No. 12 (5). Pp. 347–355. DOI: 10.1016/j.geog.2021.07.005. EDN VTENPR.
24. 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). 25 p. DOI: 10.1145/3569458
25. Alamdari A.M., Jabarzadeh Y., Adams B., Samson D., Khanmohammadi S. An analytic network process model to prioritize supply chain risks in green residential megaprojects // *Operations Management Research*. 2022. No. 16 (9). Pp. 1–23. DOI: 10.1007/s12063-022-00288-2. EDN UOWIHH.
26. Bjerga T., Aven T., Zio E. Uncertainty treatment in risk analysis of complex systems: The cases of STAMP and FRAM // *Reliability Engineering and System Safety*. 2016. No. 156 (1). Pp. 203–209. DOI: 10.1016/j.res.2016.08.004

REFERENCES

1. Bolodyan I.A., Vogman L.P., Korolchenko D.A. Experimental and analytical studies of the fire hazard of materials used in equipment with oxygen-enriched media and ways to reduce their flammability. *Pozharovzryvobezopasnost/Fire and Explosion Safety*. 2023; 3(32):17-30. DOI: 10.22227/0869-7493.2023.32.03.17-30. EDN FOZJMS. (rus).
2. Orlov G.G., Korolchenko D.A., Korolchenko A.Y. Determination of the value and character of the explosive loads in case of using of the inertial safety construction. *Pozharovzryvobezopasnost/Fire and Explosion Safety*. 2015; 4(24):47-55. EDN TVFFSB. (rus).
3. Stroykov G.A., Babyr N.V., Ilin I.V., Marchenko R.S. System of comprehensive assessment of project risks in energy industry. *International Journal of Engineering, Transaction A: Basics*. 2021; 34(7):1778-1784. DOI: 10.5829/IJE.2021.34.07A.22. EDN DZMCQN.
4. Srikrishnan V., Lafferty D.C., Wong T.E., Lamontagne J.R., Quinn J.D., Sharma S. et al. Uncertainty Analysis in Multi-Sector Systems: Considerations for Risk Analysis, Projection, and Planning for Complex Systems. *Earth's Future*. 2022; 10(8). DOI: 10.1029/2021EF002644. EDN CJZDWL.
5. Arefyeva E.V., Barinov A.V., Bobariko A.V., Boreiko V.Ya., Vinogradov O.V. Protection in emergency situations. *EMERCOM of Russia. 2nd revised edition*. Moscow, AGZ EMERCOM of Russia, 2018; 400. URL: https://rusneb.ru/catalog/000199_000009_009934396/ (rus).
6. Ammunition : *Study Guide, in 2 vol.* / ed. by V.V. Selivanov. 3rd Edition. Moscow, Bauman Moscow State Technical University, 2019; 346.
7. Kotlyarevskiy V.A. *Strength and protective properties of special structures: calculation methods and software*. Magnitogorsk, LLC “VELD”, 2014; 86. URL: https://rusneb.ru/catalog/000199_000009_007871487/ (rus).
8. Mishuev A.V. *Air shock wave in structures*. Moscow, Library of Scientific developments and Projects of the National Research University MGSU, 2015; 408. EDN XCXUIX. (rus).
9. Baloshin Yu.A., Zarichnyak Yu.P., Uspenskaya M.V. Physical foundations of nuclear energy : *textbook*. Part II. St. Petersburg, ITMO University, 2015; 88.
10. Baker W., Cox P., Western P., Kulesh D., Strelow R. *Explosive phenomena. Assessment of consequences*. In 2 books. Book 2 / transl. from English ed. by Ya.B. Zeldovich, B.E. Gelfand. Moscow, Mir, 1986; 382. URL: https://rusneb.ru/catalog/000200_000018_rc_621191/ (rus).
11. Mkrtychev O.V. Safety of buildings and structures under seismic and emergency impacts : *monograph*. Moscow, MGSU, 2010; 152. EDN RXGPIZ. (rus).
12. Savenkov A.Yu. Calculation of underground reinforced concrete structures for emergency impacts in a non-linear dynamic formulation : *dissertation of the candidate of technical Sciences*. Moscow, MGSU, 2023; 143. EDN WPWNCH. (rus).
13. Komarov A.A., Gromov N.V., Korolchenko A.D. The use of mesh screens to protect industrial facilities from unmanned aerial vehicles. *Occupational safety in industry*. 2025; 1:76-82. DOI: 10.24000/0409-2961-2025-1-76-82. EDN FQFAKL. (rus).
14. Ramalho F.D., Silva I.S., Ekel P.Y., Martins C.A.P. da S., Bernardes P., Libório M.P. Multimethod to prioritize projects evaluated in different formats. *MethodsX*. 2021; 8:101371. DOI: 10.1016/j.mex.2021.101371. EDN BJGJAK.
15. Podolchak N., Tsygylk N., Dziurakh Y. Building an effective personnel risks management system of the organization. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*. 2022; 4(13-118):44-52. DOI: 10.15587/1729-4061.2022.262547. EDN AAOUFS.
16. Niazi M.A. Introduction to the modeling and analysis of complex systems : a review. *Complex Adaptive Systems Modeling*. 2016; 4(1):1-3. DOI: 10.1186/s40294-016-0015-x. EDN ANLFGU.

17. Mbuli N., Mathonsi M., Seitshiro M., Pretorius Ja.H.C. Decomposition forecasting methods : a review of applications in power systems. *Energy Reports*. 2020; 6:298-306. DOI: 10.1016/j.egy.2020.11.238. EDN WKEWFM.
18. Lastovkin V.F., Kozlov A.P., Zabelin V.A. Civil defense protective structures. Nizhny Novgorod, NNGASU, 2020; 179. URL: https://bibl.nngasu.ru/electronicresources/uch-metod/health_safety/873922.pdf (rus).
19. Rudenko A.A. Organizational, technological and design solutions for the restoration, repair, strengthening and replacement of damaged building elements : *monograph*. Kursk, University Book, 2025; 174. (rus).
20. Hernández-Orozco S., Zenil H., Riedel J., Uccello A., Kiani N.A., Tegnér J. Algorithmic Probability-Guided Machine Learning on Non-Differentiable Spaces. *Frontiers in Artificial Intelligence*. 2021; 3:20. DOI: 10.3389/frai.2020.567356. EDN BSPNPV.
21. Ghosh S., Zaboli A., Hong Ju., Kwon Ja. An Integrated Approach of Threat Analysis for Autonomous Vehicles Perception System. *IEEE Access*. 2023; 11:14752-14777. DOI: 10.1109/ACCESS.2023.3243906. EDN UPQVKP.
22. Mikhno E.P. *Elimination of consequences of accidents and natural disasters*. Moscow, Atomizdat, 1989; 288. URL: <https://search.rsl.ru/ru/record/01007653694> (rus).
23. Dvulit P., Savchuk S., Sosonka I. Accuracy estimation of site coordinates derived from GNSS-observations by non-classical error theory of measurements. *Geodesy and Geodynamics*. 2021; 12(3):347-355. DOI: 10.1016/j.geog.2021.07.005. EDN VTENPR.
24. 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):25. DOI: 10.1145/3569458
25. Alamdari A.M., Jabarzadeh Y., Adams B., Samson D., Khanmohammadi S. An analytic network process model to prioritize supply chain risks in green residential megaprojects. *Operations Management Research*. 2022; 16(9):1-23. DOI: 10.1007/s12063-022-00288-2. EDN UOWIHH.
26. Bjerga T., Aven T., Zio E. Uncertainty treatment in risk analysis of complex systems: The cases of STAMP and FRAM. *Reliability Engineering and System Safety*. 2016; 156(1):203-209. DOI: 10.1016/j.res.2016.08.004

Поступила 07.05.2025, после доработки 07.09.2025;

принята к публикации 08.09.2025

Received May 07, 2025; Received in revised form September 07, 2025;

Accepted September 08, 2025

Информация об авторе

РУДЕНКО Александр Алексеевич, д.э.н., к.т.н., профессор, профессор кафедры организации строительства, Санкт-Петербургский государственный архитектурно-строительный университет (СПбГАСУ), Россия, 190005, г. Санкт-Петербург, ул. 2-я Красноармейская, 4; SPIN-код: 6922-0113; ORCID: 0009-0008-2338-0102; ResearcherID: ABA-8121-2021; AuthorID: 57224505043; PИНЦ ID: 664021; e-mail.rudenko.a@mail.ru

Information about the authors

Aleksander A. RUDENKO, Dr. Sci. (Economic), Cand. Sci. (Eng.), Professor, Professor of the Department of Construction Organization, St. Petersburg State University of Architecture and Civil Engineering (SPbGASU), 2nd Krasnoarmeyskaya st., 4, St. Petersburg, 190005, Russian Federation; SPIN-code: 6922-0113; ORCID: 0009-0008-2338-0102; ResearcherID: ABA-8121-2021; AuthorID: 57224505043; ID RSCI: 664021; e-mail.rudenko.a@mail.ru

Экспериментальная оценка эффективности функциональных материалов, содержащих микрокапсулированный перфтор(2-метил-3-пентанон), для обеспечения пожарной безопасности литий-ионных аккумуляторных батарей транспортных средств

Дмитрий Михайлович Якунов¹, Александра Анатольевна Серцова²✉, Сергей Валерьевич Красильников², Алексей Федорович Колбасов³, Олег Викторович Двоенко⁴

¹ Государственный научный центр Российской Федерации «Центральный ордена Трудового Красного Знамени научно-исследовательский автомобильный и автомоторный институт «НАМИ», г. Москва, Россия

² ООО «МФА ТЕХ», г. Москва, Россия

³ ГУП «Московский метрополитен», г. Москва, Россия

⁴ Академия Государственной противопожарной службы Министерства Российской Федерации по делам гражданской обороны, чрезвычайным ситуациям и ликвидации последствий стихийных бедствий, г. Москва, Россия

АННОТАЦИЯ

Введение. Растущий спрос на электрический транспорт требует новых методов и подходов для обеспечения пожарной безопасности литий-ионных аккумуляторов (ЛИА). Наличие в их составе легковоспламеняющихся растворителей электролита и нестабильных материалов катода и анода обуславливает их высокую пожарную опасность и склонность к тепловому разгону. На сегодняшний день для локализации возгорания ЛИА на начальной стадии применяются только пассивные системы защиты, а методы активного пожаротушения не используются. Разработка новых способов, позволяющих реализовать активное пожаротушение на начальной стадии пожара, является актуальной задачей.

Цели и задачи. Оценить эффективность использования функциональных материалов, содержащих микрокапсулированное газовое огнетушащее вещество (ГОТВ) перфтор(2-метил-3-пентанон) (микрокапсулы с ФК 5-1-12) для ликвидации возгорания ЛИА.

Материалы и методы. Использовали пожаротушащие листы, содержащие 50 мас. % микрокапсул с ФК 5-1-12. Объект испытаний: ЛИА типа NMC 30Ач, сборка 2 и 6 штук. Тепловой разгон и возгорание ЛИА инициировали внешним нагревом.

Результаты и их обсуждение. Проведена экспериментальная оценка эффективности функциональных материалов для обеспечения пожарной безопасности сборок ЛИА. Установлено, что для сборки, состоящей из двух аккумуляторов, не было зафиксировано открытого горения, даже при использовании внешних источников зажигания. ГОТВ превентивно выделяется из материала и препятствует возгоранию, создавая внутри и снаружи сборки негорючую атмосферу. Для сборки, состоящей из шести ЛИА, защищенной функциональными материалами, также не наблюдалось открытого горения и значительного роста температуры во время проведения эксперимента. Отмечено замедление теплового разгона (с 15 с до 1,5 мин) без использования штатных систем охлаждения.

Выводы. Функциональные материалы, содержащие микрокапсулы с ФК 5-1-12, эффективно подавляют возгорание ЛИА. За счет превентивной эмиссии ГОТВ они не позволяют начаться открытому горению, значительно замедляют теплопередачу и скорость теплового разгона от аккумулятора к аккумулятору за счет отсутствия лучистого теплообмена и частичного отвода тепла.

Ключевые слова: литий-ионный аккумулятор; пожаротушащие материалы; микрокапсулы; газовое огнетушащее вещество перфтор (этил-изопропилкетон); локализация возгорания; тепловой разгон; микрокапсулированное огнетушащее вещество; электротранспорт; электромобили; гибридные автомобили; гибриды; безопасность электротранспорта

Для цитирования: Якунов Д.М., Серцова А.А., Красильников С.В., Колбасов А.Ф., Двоенко О.В. Экспериментальная оценка эффективности функциональных материалов, содержащих микрокапсулированный перфтор(2-метил-3-пентанон), для обеспечения пожарной безопасности литий-ионных аккумуляторных батарей транспортных средств // Пожаровзрывобезопасность/Fire and Explosion Safety. 2025. Т. 34. № 5. С. 47–62. DOI: 10.22227/0869-7493.2025.34.05.47-62

✉ Серцова Александра Анатольевна, e-mail: sertsowa.aa@mfatech.ru

Experimental evaluation of the efficiency of functional materials containing microencapsulated perfluoro(2-methyl-3-pentanone) to ensure fire safety of lithium-ion batteries of electrical vehicle

Dmitry M. Yakunov¹, Alexandra A. Sertsova²✉, Sergey V. Krasilnikov², Alexey F. Kolbasov³, Oleg V. Dvoenko⁴

¹ State Research Center of the Russian Federation Central Research Institute of Automobiles and Motor Vehicles "NAMI", Moscow, Russian Federation

² LLC "MFA TECH", Moscow, Russian Federation

³ SUE "Moscow Metro", Moscow, Russian Federation

⁴ 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. The increasing demand for electric vehicles requires new methods for fire protection of lithium-ion batteries (LIB). Flammable electrolyte solvents and unstable cathode and anode materials are the reason for their fire hazard and thermal runaway. Currently, only passive protection systems are used to suppress LIB fires at the initial stage. Methods of active fire extinguishing are not used. The development of new methods that allow the use of active fire extinguishing at the initial stage of a fire is a pressing task.

Aims and purposes. To evaluate the effectiveness of functional materials containing microencapsulated fire extinguishing agent perfluoro(2-methyl-3-pentanone) (microcapsules with FK 5-1-12) for LIB fire suppression.

To evaluate the effectiveness of functional materials containing microencapsulated gas extinguishing agent (GEA) perfluoro(2-methyl-3-pentanone) (microcapsules with FC 5-1-12) for LIA fire suppression.

Materials and methods. The fire of the LIB was suppressed using functional materials containing 50 wt. % microcapsules with FK 5-1-12. Assemblies of NMC cells (30Ah) in quantities 2 and 6 cells were selected for testing. Thermal runaway and ignition of the LIB were initiated by external heating.

Results and discussion. An experimental evaluation of the use of functional materials containing microcapsules with FK 5-1-12 to ensure fire safety of LIB was carried out. It was found that combustion was not detected for the 2 cells LIB assembly even when external ignition sources were used. The fire extinguishing agent was preventively released from the material and inhibited fire. There was a non-flammable atmosphere inside and outside the assembly. No combustion or significant temperature increase were also observed during the experiment for the 6 cells LIB assembly protected by fire-extinguishing sheets. A slowdown in thermal runaway (from 15 sec to 1.5 minutes) was noted without the use of standard cooling systems.

Conclusions. Functional material containing microcapsules with FK 5-1-12 suppress the combustion of LIB. They did not allow open fire, significantly slowed down heat transfer and the rate thermal runaway from cell to cell due to the absence of radiant heat exchange and partial heat removal.

Keywords: lithium-ion battery; fire extinguishing materials; microcapsules; clear agent perfluoro(2-methyl-3-pentanone); fire localization; thermal runaway; microencapsulated fire extinguishing agent; electric vehicle; hybrid vehicle; electric vehicle safety

For citation: Yakunov D.M., Sertsova A.A., Krasilnikov S.V., Kolbasov A.F., Dvoenko O.V. Experimental evaluation of the efficiency of functional materials containing microencapsulated perfluoro(2-methyl-3-pentanone) to ensure fire safety of lithium-ion batteries of electrical vehicle. *Pozharovzryvobezopasnost/Fire and Explosion Safety*. 2025; 34(5):47-62. DOI: 10.22227/0869-7493.2025.34.05.47-62 (rus).

✉ Alexandra Anatolievna Sertsova, e-mail: sertsova.aa@mfacech.ru

Введение

Литий-ионные аккумуляторы (ЛИА) зарекомендовали себя как надежные устройства хранения энергии с высокой энергоемкостью, долговечностью, отсутствием эффекта памяти и другими положительными характеристиками. Мировой рынок ЛИА вырастет с 0,7 ТВт в 2022-м до 4,7 ТВт к 2030 г. по прогнозу McKinsey&Company¹. Основным драйвером его раз-

вития станет электрический транспорт, который уже сегодня формирует более 85 % спроса и для которого ЛИА является практически безальтернативным вариантом [1]. Около 4,3 ТВт к 2030 г. будет приходиться именно на электрический транспорт: легковые электромобили, коммерческие автомобили, маневровые локомотивы, электробусы, карьерные самосвалы, средства индивидуальной мобильности и прочее. Доминирование ЛИА для электрического транспорта обусловлено тем, что технология их производства отработана, масштабирована, а производственные мощности уже введены в эксплуатацию, что приво-

¹ Battery 2030: Resilient, sustainable, and circular. URL: <https://www.globalbattery.org/media/publications/battery-2030-resilient-sustainable-and-circular.pdf>

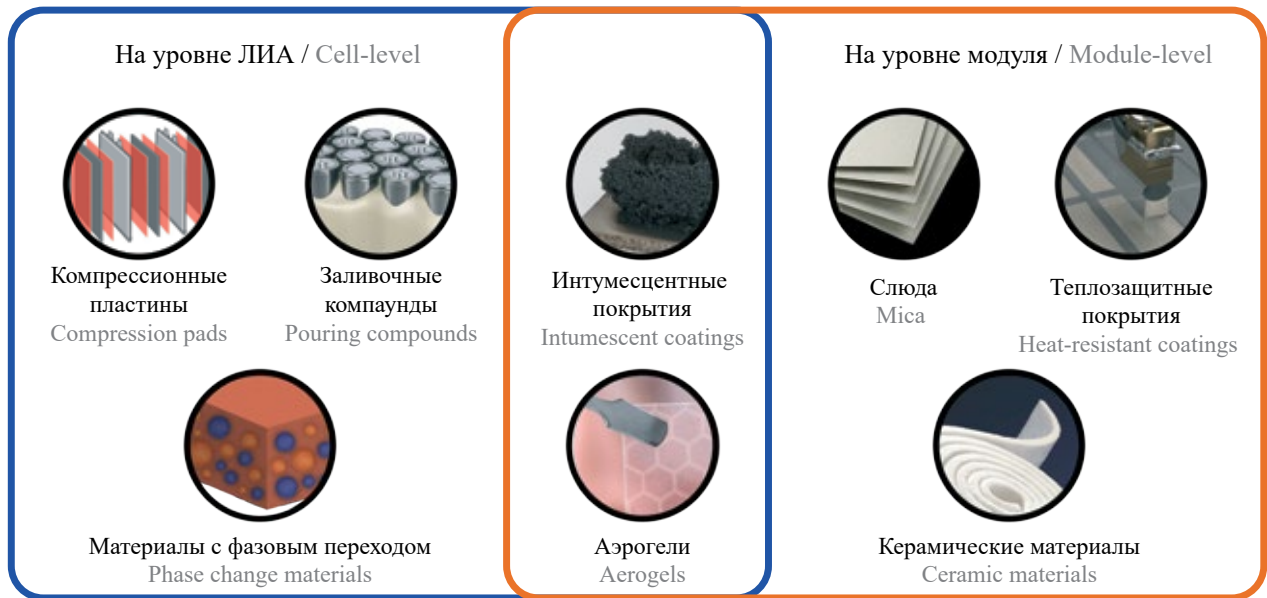


Рис. 1. Основные виды материалов, использующихся для защиты ЛИА и модулей²
 Fig. 1. The main types of materials used to protect LIB and modules²

дит к снижению стоимости аккумуляторных батарей (АКБ) с 535 \$/кВтч в 2013 г. до 107 \$/кВтч в 2023-м (указана приведенная стоимость в ценах 2023 г.), а альтернативные технологии все еще находятся на достаточно низком уровне технологической готовности (НИРы, НИКОРы и прототипы) [2].

Несмотря на многочисленные преимущества и высокий спрос ЛИА не лишены недостатков, не последним из которых является безопасность. В результате неправильной эксплуатации, брака при производстве или другой нештатной ситуации в аккумуляторе может начаться тепловой разгон, являющийся причиной возгорания и взрыва [3–5]. При этом возгорание в одном элементе приводит к цепному воспламенению конечного устройства, что, в свою очередь, влечет невосполнимую потерю дорогостоящего оборудования. Высокая пожарная опасность и тепловой разгон в ЛИА в первую очередь обусловлены наличием в их составе легковоспламеняющихся компонентов: электролита и химически активных материалов анода и катода, которые выделяют большое количество кислорода и водорода при разложении [6].

Проблема теплового разгона ЛИА в транспортных средствах актуальна [7] и, несмотря на множество имеющихся решений, минимизирующих возгорание и каскадирование ЛИА [8], не имеет единого решения. Современные аккумуляторы оснащены проницаемой мембраной-сепаратором, клапанами сброса давления, устройствами прерывания тока и иной защитой [9, 10]. Модули укомп-

лектуются контроллерами, защищающими от перегрузки, перезаряда и короткого замыкания. На уровне АКБ используются системы принудительного охлаждения (TMS) воздушного или жидкостного типа [11, 12], а также на основе материалов с фазовым переходом (PCM) [13, 14] контроллеры управления батареями (BMS) [15].

Кроме того, для защиты ЛИА активно используются теплоизоляционные, огнезащитные и противопожарные материалы, среди которых наиболее востребованы аэрогели, слюда, интумесцентные покрытия, силиконовые листы, графитовые пленки, негорючие пеноматериалы (рис. 1). Их использование в составе комплексной защиты замедляет теплообмен: передачу тепла от аккумулятора к аккумулятору, от модуля к модулю или от модуля к конечному устройству, снижает скорость теплового разгона, что, в свою очередь, снижает вероятность и количество пожаров [16].

Все перечисленные методы и подходы обеспечивают пассивную защиту, а методы активного пожаротушения на практике используются редко и исключительно на высшем уровне архитектуры АКБ. При этом если теплового разгона и возгорания избежать не удастся, например в случае внутреннего короткого замыкания ЛИА [17], необходимо принять все меры для локализации пожара на уровне одного или нескольких аккумуляторов и не допустить распространения тепла и открытого горения на соседние модули и оборудование в целом.

На сегодняшний день для тушения ЛИА систематически испытаны и описаны порядка 20 огне-тушащих веществ на водной, газовой и порошковой основе, однако не выработано единое решение,

² IDTechEx reports Fire Protection Materials for Electric Vehicle Batteries 2023–2033. URL: <https://www.idtechex.com/en/research-report/fire-protection-materials-for-electric-vehicle-batteries-2023-2033/897>

а эффективность того или иного средства в большой степени зависит от типа ЛИА (форм-фактор, электролитическая схема, емкость и прочее), конструкции АКБ, области применения, способа подачи огнетушащего вещества и других факторов [18, 19].

В ряде работ была показана эффективность использования газовых огнетушащих веществ (ГОТВ), таких как гептафторпропан (HFC-227ea) [20], перфтор (2-метил-3-пентанон) [21], 2-бромтрифторпропен (2-ВТР) [22], для локализации возгорания ЛИА на ранней стадии. Механизм действия перечисленных выше веществ основан на химическом ингибировании реакций горения за счет связывания свободных радикалов О, Н и ОН [23], а эффективность при тушении ЛИА превосходит CO_2 , огнетушащий порошок АВС и другие вещества [21].

Из всех перечисленных газовых огнетушащих веществ наиболее активно для тушения ЛИА изучается перфтор(2-метил-3-пентанон) (ФК-5-1-12). Это связано с тем, что кроме эффективного подавления пламени на химическом уровне он способен поглощать тепло за счет фазового перехода из жидкого в газообразное состояние с эндотермическим тепловым эффектом 111 Дж/г. В работе [24] была показана эффективность перфтор(2-метил-3-пентанона) по подавлению возгорания сборки из 12 аккумуляторов 18650 типа LCO (2.6 Ач, 3.7 В, SOC = 100 %). Тепловой разгон одного ЛИА в составе сборки вызывали методом электронагрева. При концентрации огнетушащего вещества, равной 15,2 об. %, происходило подавление возгорания и предотвращение теплового разгона в сборке. Ниже указанного значения наблюдалось подавление возгорания и снижение скорости распространения теплового разгона, однако полностью предотвратить передачу тепла от аккумулятора к аккумулятору не удалось. В работе [25] тепловой разгон модуля, состоящего из 7 аккумуляторов типа LFP (призматический ЛИА, 271 Ач, SOC = 100 %), также удалось предотвратить с помощью перфтор(2-метил-3-пентанона), в других экспериментах на сборке из 28 аккумуляторов типа LFP (призматический ЛИА, 24 Ач) [26] и сборке двух NMC (призматический ЛИА, 117 Ач) [27] не удалось его остановить полностью, но отмечено значительное снижение скорости его распространения. В работах [22, 28] показана эффективность перфтор(2-метил-3-пентанона) для локализации возгорания единичных аккумуляторов типа NMC (призматический и пакетный ЛИА) емкостью от 30 до 50 Ач. Во всех перечисленных работах отмечено, что перфтор(2-метил-3-пентанона) эффективно подавляет открытое горение, также наблюдалось быстрое подавление пламени в интервалах времени от 2 до 30 с и отсутствие повторного возгорания.

Следует отметить, что в описанных выше работах проведены либо модельные эксперименты, при

которых подача огнетушащего вещества производилась из сосуда непосредственно в очаг возгорания — сборку аккумуляторов, либо инъекция огнетушащего вещества непосредственно в рабочий модуль или АКБ. Именно в последнем случае используемые огнетушащие вещества показывали наибольшую эффективность и быстро подавляли возгорание. В работе показано [29], что применение перфтор (2-метил-3-пентанона) для тушения ЛИА в объемном заполнении менее эффективно и требует большого расхода огнетушащего вещества.

Однако организация быстрой подачи огнетушащего вещества в модуль или АКБ, которые расположены внутри оборудования (электромобиль или стационарный промышленный накопитель энергии), представляется сложной задачей, требующей установки дополнительного баллона с огнетушащим веществом, оснащенного системой трубопроводов, сенсоров открытого огня и теплового разгона, инжекторной системы и прочего дополнительного оборудования [30]. Предложенная схема эффективна (как было показано в исследованиях выше), однако требует регулярного технического обслуживания, дозаправки огнетушащего вещества, усложнения конструкции АКБ и конечного оборудования, увеличения массы накопителя энергии. Поэтому разработка новых методов и подходов хранения и доставки огнетушащих веществ, позволяющих реализовать активное пожаротушение на начальной стадии возгорания ЛИА, на уровне одного или нескольких аккумуляторов, в непосредственной близости к очагу возгорания без использования дополнительного инженерного оборудования является актуальной задачей.

В настоящей работе предложено использовать функциональные материалы, содержащие в своем составе газовое огнетушащее вещество (ГОТВ) — перфтор(2-метил-3-пентанон) для локализации возгорания ЛИА на ранней стадии. Такие материалы представляют собой полимерные композиты, состоящие из микрокапсул с огнетушащим веществом и термореактивного связующего. Согласно ГОСТ Р 56459–2015³ их относят к автономным устройствам пожаротушения с применением термоактивируемых микрокапсулированных газовыделяющих огнетушащих веществ, предназначенных для тушения пожаров классов А и В (по ГОСТ 27331⁴) и электрооборудования под напряжением в объектах защиты малого объема без участия человека. В ряде исследований

³ ГОСТ Р 56459–2015. Устройства пожаротушения автономные с применением термоактивируемых микрокапсулированных газовыделяющих огнетушащих веществ. Общие технические требования. Методы испытаний.

⁴ ГОСТ 27331–87 (СТ СЭВ 5637–86). Пожарная техника. Классификация пожаров.

[31–33] была показана эффективность использования микрокапсул с перфтор(2-метил-3-пентанона) для локализации возгорания ЛИА.

Материалы и методы

В работе исследовали эффективность функциональных материалов, содержащих ГОТВ перфтор(2-метил-3-пентанон) ФК-5-1-12, для локализации возгорания сборок литий-ионных аккумуляторов на начальной стадии возгорания.

В качестве объекта испытаний были выбраны литий-ионные аккумуляторы со следующими характеристиками: форм-фактор — пакетный ЛИА, материал катода — литий-никель-марганец-кобальт-оксид (NMC), емкость — 30Ач, номинальное напряжение 3,6–3,7 В. Аккумуляторы испытывали в составе сборки из 2 и 6 штук. Данный тип ЛИА был выбран по двум причинам. Первая — их востребованность (более 50 %) для применения в составе аккумуляторных батарей электрического транспорта. Вторая — высокая пожарная опасность, обусловленная высокой емкостью, активным материалом катода и горючим растворителем электролита.

Для защиты сборок ЛИА использовали функциональные материалы, содержащие 50 мас. % огнетушащего вещества (далее — пожаротушащие листы), более подробные технические характеристики которых приведены в табл. 1. Количество пожаротушащих листов подбиралось индивидуально в зависимости от количества аккумуляторов в сборке.

В работе испытания проводили в соответствии с разработанной программой и методикой, в основе которой лежит методология испытаний по ГОСТ Р МЭК 62619–2023⁵. Согласно методике, тепловой разгон инициировали резистивным нагревом с использованием патронных трубчатых электронагревателей (далее — ТЭН). Нагревательные элементы размещались между двумя ЛИА, в результате чего происходил тепловой разгон двух (контактирующих с ТЭН) элементов одновременно. Внутри блока ЛИА или в непосредственной близости с ним размещали термопары для измерения температуры в зоне теплового разгона. Дополнительно измеряли температуру сборки в ходе эксперимента бесконтактным методом при помощи пирометра. Эксперименты проводили на открытой площадке при температуре воздуха 7 ± 2 °С.

Для сравнения и оценки эффективности пожаротушащих материалов проводили холостые эксперименты, в которых блок из 2 или 6 аккумуляторов подвергали тепловому разгону без использования

⁵ ГОСТ Р МЭК 62619–2023. Аккумуляторы и аккумуляторные батареи, содержащие щелочной или другие неокислотные электролиты. Требования безопасности для литиевых аккумуляторов и батарей промышленных применений.

Таблица 1. Свойства пожаротушащих листов
Table 1. Properties of fire extinguishing sheets

Параметр Parameter	Значение Value	Комментарий Note
Основа/матрица Base/matrix	Силиконовое связующее, гибкое исполнение Silicone adhesive, flexible	—
Размер микрокапсул с огнетушащим веществом, мкм Size of microcapsules with fire extinguishing agent, mkm	150–300	По данным изображений со сканирующего электронного микроскопа Based on scanning electron microscope images
Количество микрокапсул, мас. % Amount of microcapsules, mas. %	50 ± 2	Испытания в муфельной печи Muffle furnace tests
Диэлектрическая прочность, кВ/мм Dielectric strength, kV/mm	25	Технические параметры силиконового связующего TDS for silicone resin
Утечка огнетушащего вещества при 60 °С, % Leakage of fire extinguishing agent at 60 °C, %	$0,1 \pm 0,05$	Испытания в камере в течение 30 дней 30 day chamber testing
Температура срабатывания, °С Response temperature, °C	140 ± 3	Термический анализ Thermogravimetric analysis
Температура эксплуатации, °С (от/до) Operating temperature, °C (from/to)	–40/+90	Испытания в климатической камере Climatic chamber tests

пожаротушащих материалов. Оценивали время появления открытого пламени, скорость теплового разгона, температуру ЛИА после окончания эксперимента и другие параметры.

Результаты и их обсуждение

Эксперимент № 1

На первом этапе испытали сборку ЛИА, состоящую из 2 элементов. Оценку ее температуры в процессе эксперимента проводили только бесконтактным методом в силу сложности расположения датчиков температуры непосредственно внутри



a



b

Рис. 2. Сборка, состоящая из двух ЛИА, обернутая пожаротушащим листом: *a* — вид прямо; *b* — вид сбоку
Fig. 2. Assembly of 2-cell LIB, wrapped in fire-extinguishing sheet: *a* — straight ahead view; *b* — side view

сборки. Для проведения эксперимента сборку ЛИА обернули пожаротушащими листами, как показано на рис. 2, *a* и 2, *b*, и установили на испытательный стенд. Масса пожаротушащего листа, используемого в испытании, составила 450 г, геометрические размеры $450 \times 250 \times 3$ мм, содержание действующего вещества перфтор(2-метил-3-пентанона) составило 225 ± 9 г.

Продолжительность эксперимента (эксперимент 1.2) составила 10 мин при условии, что разгерметизация элементов началась только через 5 мин после начала нагрева и была идентифицирована по характерному звуку и интенсивному дымообразованию. При этом на протяжении всего эксперимента не было зафиксировано открытого горения. Более того, на 6-й (факел № 1) и 7-й минуте эксперимента проводили дополнительное внесение внешних источников зажигания с целью поджига газообразных веществ, выделяющихся при тепловом разгоне аккумуляторов. Это не привело к возгоранию, что, вероятно, объясняется высокой концентрацией ГОТВ, выделившегося из пожаротушащего листа, достаточной для придания газовой смеси негорючести.

После окончания эксперимента сборку открыли, установили, что оба ЛИА подверглись тепловому разгону, пожаротушащий лист взвесили для оценки степени срабатывания материала. Его остаточная масса составила 250 г, следовательно, в результате проведения эксперимента произошло высвобождение около 80 мас. % огнетушащего вещества. Эмиссия ГОТВ происходила с внутренней части пластины, внешние слои остались без изменения (рис. 3, *a*), о чем свидетельствует характерное изменение окраски в более светлые тона. По данным пирометри-

ческих измерений температура сборки на момент окончания эксперимента не превышала 150°C .

В «холостом» эксперименте (эксперимент 1.1) со сборкой ЛИА, незащищенной пожаротушащими листами, открытое пламя появилось через 18 с после старта, а выгорание элементов произошло за 90 с, инициирование возгорания внешним источником (факелом) не потребовалось. Подробная информация по экспериментам 1.1 и 1.2 приведена в табл. 2.

Из полученных данных был сделан вывод, что для защиты сборки двух аккумуляторов, подвергшихся принудительному тепловому разгону в результате внешнего нагрева, достаточно 250 г пожаротушащего материала при толщине 3 мм для ингибирования реакций горения и полного подавления пламенного горения. Огнетушащее вещество, выделяющееся из пожаротушащего листа, создает внутри и вокруг сборки ЛИА негорючую атмосферу, поэтому возгорания и открытого пламенного горения не происходит даже при внесении внешнего источника зажигания. На основании данных пирометрических измерений отмечено значительное снижение температуры элементов (с 450 до 150°C) при защите их пожаротушащими материалами. Косвенно, по внешнему виду ЛИА (рис. 3, *a*), можно сделать вывод, что температура внутри сборки не превышала $150\text{--}200^\circ\text{C}$, поскольку даже монтажные элементы, выполненные из низкотемпературных материалов, остались неповрежденными, а внешние слои листов пожаротушащего материала (с температурой срабатывания не менее 150°C) после окончания эксперимента — неизменными (рис. 3, *b*).

Таблица 2. Результаты испытаний сборки, состоящей из 2 аккумуляторов
Table 2. Test results of 2-cell assembly LIB

Параметр Parameter	Эксперимент 1.1 Test 1.1	Эксперимент 1.2 Test 1.2
Степень заряда ЛИА, % State of charge of LIB, %	~ 60	~ 60
Время появления открытого пламени, с Open flame appearance time, s	18	Нет открытого пламени No open flame
Возгорание при достижении максимального значения температуры теплового разгона Ignition upon reaching the maximum thermal runaway temperature	Открытое реактивное горение Open jet fire	Отсутствует Absent
Внешнее инициирование возгорания внешним источником зажигания (факел № 1) External ignition by external ignition source (torch No. 1)	Не требовалось Not required	Отсутствует Absent
Повторное внешнее инициирование возгорания внешним источником зажигания (факел № 2) Re-initiation of combustion by external ignition source (torch No. 2)	Не требовалось Not required	Отсутствует Absent
Температура после окончания эксперимента, °С Temperature after the end of the experiment, °C	~450	~150
Степень срабатывания листа пожаротушащего материала после испытаний, % The degree of response of the fire extinguishing material sheet after testing, %	–	80



a



b

Рис. 3. Внешний вид пожаротушащих пластин после проведения эксперимента № 1: *a* — после разборки на части; *b* — в сборке

Fig. 3. External appearance of fire extinguishing sheets after experiment No. 1: *a* — after disassembly into parts; *b* — in assembly

Эксперимент № 2

На втором этапе работы испытали блок ЛИА, состоящий из шести элементов. Для данного эксперимента (эксперимент 2.2) были подготовлены пожаротушащие листы размером $180 \times 100 \times 2,1$ мм (масса 50 г) в количестве 8 штук, которыми прокладывался каждый аккумулятор, как показано на рис. 4, *a*. В отличие от эксперимента 1 сборку не оборачивали листами, а располагали в модельном металлическом шкафу с габаритными размерами $395 \times 310 \times 220$ мм и внутренним объемом, равным

26 л, для воссоздания эффекта теплового разгона в негерметичном объеме без системы охлаждения и интенсивного теплообмена. В шкаф дополнительно установили 4 листа, выполненных из пожаротушащего материала, как показано на рис. 4, *b* (вдоль стенок шкафа). Суммарное количество материала составило 900 г, а количество огнетушащего вещества — 450 ± 10 г. Нагревательный элемент устанавливали в центр сборки между внутренними аккумуляторами № 3 и 4 (рис. 5). «Холостой» эксперимент (эксперимент 2.1) с шестью ЛИА, незащищенными пожаротушащими листами,

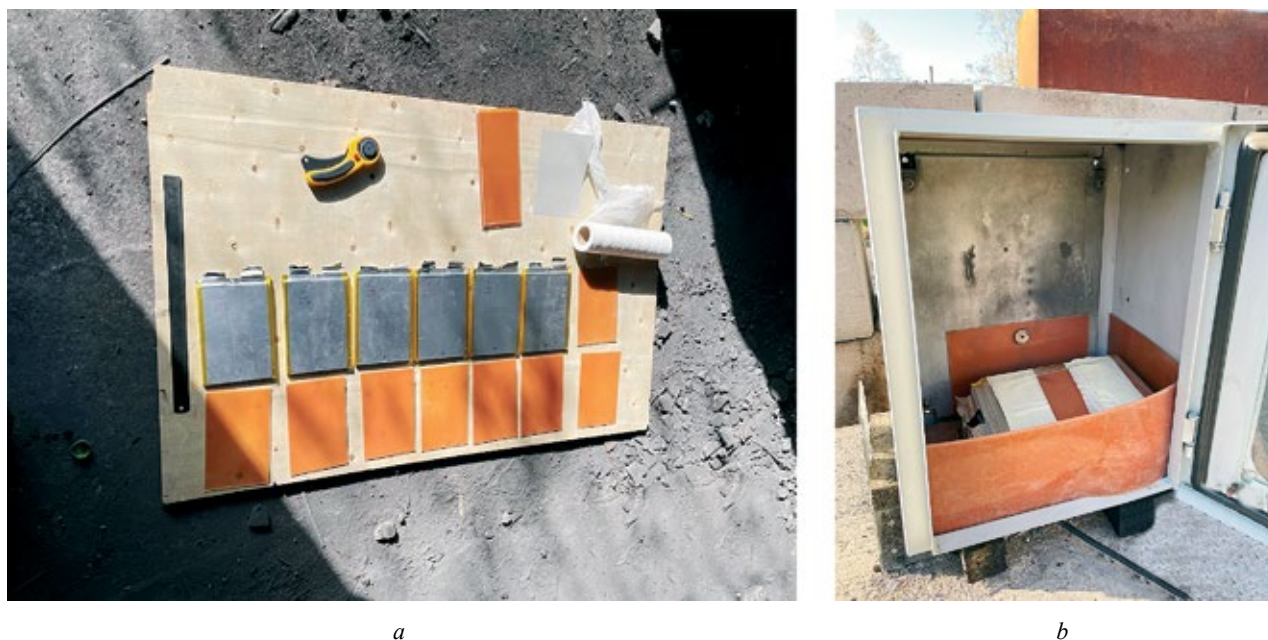


Рис. 4. Подготовка сборки ЛИА к испытанию № 2: *a* — расположение пожаротушащих листов вдоль шкафа; *b* — расположение пожаротушащих листов внутри модельного шкафа
Fig. 4. Preparing the LIB assembly for test No. 2: *a* — arrangement of fire extinguishing sheets along the model cabinet; *b* — arrangement of fire extinguishing sheets inside the model cabinet

проводили на открытой площадке (рис. 6, *a*). Подробная информация по экспериментам 2.1 и 2.2 приведена в табл. 3.

В табл. 3 приведены результаты испытаний сборок ЛИА, состоящих из 6 элементов, которые были проведены без и с использованием пожаротушащих листов.

Разгерметизация элементов № 3 и 4 в результате теплового разгона (нумерация в соответствии со схемой, приведенной на рис. 5) произошла через 1:05 мин после начала эксперимента (подачи напряжения на патронный ТЭН) и не сопровождалась открытым горением. После снижения интенсивности дымообразования наблюдалось снижение температуры внутри модельного шкафа (рис. 7). Разгерметизация аккумулятора № 2 и 5 наступила через 3:45 и 5:55 мин от начала эксперимента соответственно, открытого горения также не зафиксировано. Для сравнения, разгерметизация пары ЛИА № 2 и 5 в ходе «холодого» эксперимента со сборкой, не защищенной пожаротушащими листами, наступает через 15 с вследствие быстрой передачи тепла преимущественно лучистым нагревом из-за наличия открытого горения (рис. 6, *a* и 6, *b*).

ГОТВ, эмиссия которого происходит из пожаротушащих листов, создает негорючую атмосферу в зоне эксперимента, препятствует образованию открытого горения, замедляет передачу тепла от аккумулятора к аккумулятору за счет изменения механизма теплопередачи в сторону конвективного и контактного теплообмена.

Стоит отметить, что шкаф, используемый для проведения эксперимента № 2, являлся негерметичным и имел перфорацию на нижней стенке, что обеспечивало приток воздуха и не приводило к снижению концентрации кислорода в зоне теплового разгона. Более того, в результате теплового разгона аккумуляторов во внутренний объем выделялось большое количество горючих газообразных веществ, являющихся продуктами разложения компонентов электролита, среди которых CH_4 , H_2 , C_2H_4 [34], а также CO и CO_2 при полном окислении [35, 36], согласно следующим превращениям:

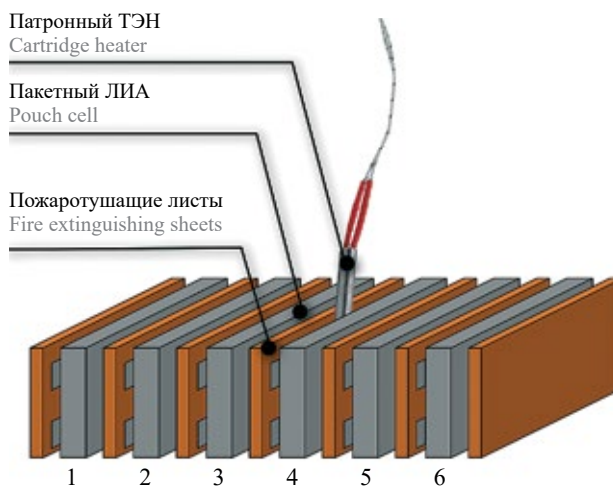
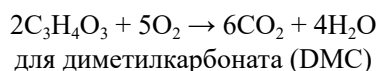


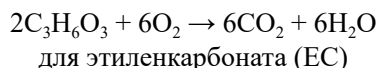
Рис. 5. Схема расположения нагревательного элемента, ЛИА и пожаротушащих листов для эксперимента № 2 (эксперимент 2.2)
Fig. 5. Layout of the heating element, LIB and fire extinguishing sheets for experiment No. 2 (test 2.2)

Таблица 3. Результаты испытаний аккумуляторного блока, состоящего из 6 элементов
Table 3. Test results of a battery assembly consisting of 6 elements

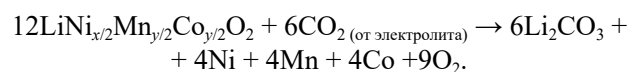
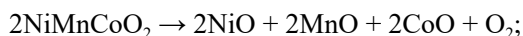
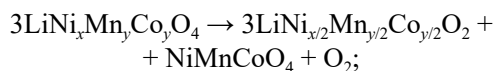
Номер элементов Element number	Параметр Parameter	Эксперимент 2.1 Test 2.1	Эксперимент 2.2 Test 2.2
1	Степень заряда ЛИА, % State of charge of LIB, %	~60	~60
2	Время появления открытого пламени, с Open flame appearance time, s	16	Нет открытого пламени No open flame
3	Возгорание при достижении максимального значения температуры теплового разгона Ignition upon reaching the maximum thermal runaway temperature	Открытое реактивное горение Open jet fire	Отсутствует Absent
4	Скорость распространения теплового разгона, с Velocity of thermal runaway propagation, s	5	160
5	Внешнее инициирование возгорания внешним источником зажигания External ignition by external ignition source	Не требовалось Not required	Отсутствует Absent
6	Степень срабатывания листа пожаротушающего материала после испытаний, % The degree of response of the fire extinguishing material sheet after testing, %	–	100



или



и кислорода от разложения материала катода типа NMC по реакции [37]:



Данными уравнениями проиллюстрирована только небольшая часть реакций, в результате которых образуется кислород и горючие вещества внутри ЛИА.

Перфтор(2-метил-3-пентанон), эмиссия которого происходит из пожаротушающих листов, создавал внутри модельного шкафа негорючую атмосферу, в результате чего не наблюдалось открытого горения, и приводил к снижению температуры за счет эндотермических процессов. Однако такого эффекта от ГОТВ в сравнении с мощным тепловыделением от аккумуляторов оказалось недостаточно для полного предотвращения распространения теплового разгона от аккумулятора к аккумулятору. По этой причине все 6 ЛИА подверглись тепловому разгону последовательно и были разгерметизированы. Кроме того, негерметичность камеры и мощный воздушный поток системы



a



b

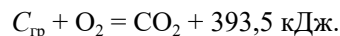
Рис. 6. Сборка, состоящая из двух ЛИА: a — без пожаротушающих листов на испытательном стенде; b — в момент возгорания
Fig. 6. Assembly of 2-cell LIB: a — without fire extinguishing sheets on a test bench; b — at the moment of ignition

удаления продуктов термодеструкции могли привести к частичному удалению огнетушащего вещества из камеры, и, соответственно, снижению его концентрации ниже порогового огнетушащего значения и повышению концентрации кислорода.

Стоит отметить, что результаты, полученные в ходе эксперимента № 2, согласуются с результатами, которые были получены в работах [26, 27], где перфтор(2-метил-3-пентанона) использовался в чистом виде. Авторы отмечают, что при срабатывании противопожарной системы происходит поглощение тепла, но этого эффекта недостаточно для остановки распространения теплового разгона.

В ходе всего эксперимента температура внутри модельного шкафа не превышала 220 °С и не было зафиксировано открытого горения. По окончании эксперимента, по истечении 10 мин при открытии модельного шкафа было зафиксировано резкое повышение температуры вплоть до 600 °С (рис. 7). Данный факт объясняется тем, что в закрытом объеме при концентрации ГОТВ выше 5–7 % (огнетушащая концентрация) в аккумуляторах, находящихся при высокой температуре, протекают реакции пиролиза (термическое разложение в недостатке кислорода, без открытого горения). Открытие дверцы модельного шкафа привело к утечке ГОТВ из зоны теплового разгона, резкому снижению его концентрации в объеме ниже порогового значения и к появлению беспрепятственного доступа кислорода (баланс огнетушащего вещества/кислорода и горючих веществ был нарушен), что, в свою очередь, привело к изменению механизма в сторону термоокислительной деструкции компонентов ЛИА, в частности твердых материалов аккумулятора, например, гра-

фита из материала покрытия анода, протекающих с значительным экзотермическим эффектом в соответствии с уравнением реакции:



К моменту открытия дверцы ящика большая часть пожаротушащих листов уже сработала, эмиссия ГОТВ прекратилась и выделившегося количества перфтор(2-метил-3-пентанона), находящегося в газовой среде экспериментального ящика, оказалось недостаточным для поддержания концентрации выше порогового значения в 5–7 %, необходимого для ингибирования реакций, протекающих с участием кислорода, и снижения температуры. Изображения элементов после эксперимента приведены на рис. 8, на основании которых можно сделать вывод, что в них прошли более глубокие процессы термического разложения, по сравнению с экспериментом № 1.2.

Таким образом, по окончании эксперимента было произведено принудительное снижение концентрации ГОТВ ниже огнетушащего значения в момент, когда самоподдерживающиеся экзотермические реакции внутри ЛИА еще не были завершены. В дальнейшем необходимо избегать удаления огнетушащего вещества из защищаемого объема до окончания экзотермических реакций внутри ЛИА и производить вскрытие сборки только после снижения температуры до нормального значения.

Результаты эксперимента № 2.2 показали, что в дальнейшем при исследовании влияния функциональных материалов, содержащих огнетушащие вещества, на динамику распространения теплового разгона необходимо проводить эксперименты

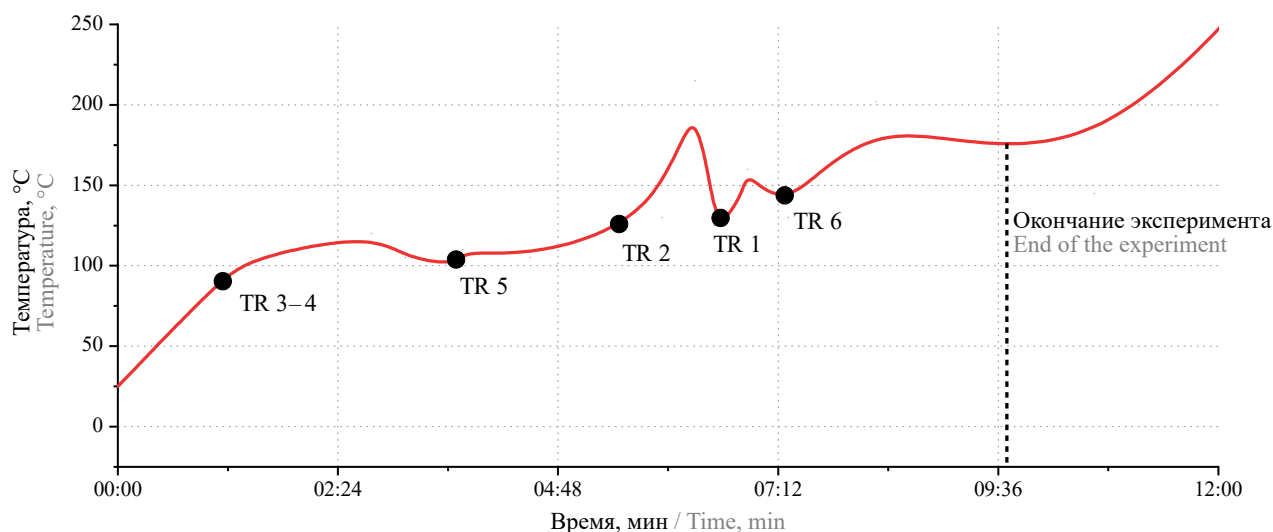


Рис. 7. Зависимость температуры от времени внутри модельного шкафа при проведении эксперимента со сборкой из 6 аккумуляторов, защищенной пожаротушащими листами

Fig. 7. Dependence of temperature on time inside the model cabinet during the experiment with an assembly of 6 LIB protected by fire extinguishing sheets



a



b

Рис. 8. ЛИА после экспериментов: *a* — № 1; *b* — № 2
Fig. 8. LIB after test: *a* — No. 1; *b* — No. 2

со штатной системой охлаждения АКБ или системой теплоизоляционных прокладок, препятствующих конвективному и контактному теплообмену, поскольку решением задачи теплообмена по этим механизмам в проведенных экспериментах пренебрегли. Также необходимо тщательно прорабатывать архитектуру АКБ и расположения в нем пожаротушащих материалов относительно ЛИА, сохранять минимально необходимое расстояние между аккумуляторами для снижения конвективного теплообмена.

Важно отметить, что в соответствии с NFPA 2001⁶ нормированная продолжительность защиты методом затопления (объемное пожаротушение) с помощью перфтор(2-метил-3-пентанона) составляет 10 мин. Продолжительность теплового разгона АКБ сильно зависит от размера, емкости, степени заряда и прочих факторов и может достигать нескольких часов. Расхождение этих параметров может ограничивать использование пожаротушащих материалов для защиты АКБ. Однако, в отличие от объемного пожаротушения, при правильной компоновке пожаротушащих материалов в модуле или сборке они могут срабатывать послойно и значительно уве-

личивать продолжительность защиты, обеспечивать отсутствие открытого огня при тепловом разгоне, сместив направление химических реакций, протекающих при тепловом разгоне, в сторону пиролизического механизма, протекающего с меньшей скоростью и с меньшим экзотермическим эффектом.

Выводы

В работе проведены эксперименты по использованию функциональных материалов, содержащих ГОТВ перфтор(2-метил-3-пентанона) в микрокапсулированном виде для защиты сборок литий-ионных аккумуляторов. Установлено, что ГОТВ, выделяющееся из пожаротушащих листов при температуре ~130 °С, создает вокруг и внутри сборки ЛИА атмосферу, не поддерживающую горение, за счет чего их тепловой разгон и разгерметизация происходят без открытого огня. Пожаротушащие листы не просто локализуют возгорание, а за счет преентивной эмиссии ГОТВ в зону теплового разгона не позволяют начаться открытому горению за счет химического ингибирования цепных реакций горения. Также отмечено замедление теплопередачи от аккумулятора к аккумулятору за счет отсутствия лучистого теплообмена и значительное снижение скорости теплового разгона. Однако проведение

⁶ NFPA 2001 Standard on Clean Agent Fire Extinguishing Systems. 2022. URL: <https://www.fire-police-ems.com/NFPA2001-2022.shtml>

эксперимента в описанной конфигурации (без штатных средств обеспечения теплообмена) замедлило, но не остановило тепловой разгон полностью. Дальнейшие эксперименты по оценке влияния пожаротушающих листов на скорость распространения теплового разгона в сборках ЛИА необходимо проводить со штатной системой теплообмена модуля.

Поскольку основным назначением пожаротушающих листов является локализация и предотвращение возгораний, а также учитывая механизм действия используемого ГОТВ, необходимо избегать удаления огнетушащего вещества из защищаемого объема до снижения температуры аккумуляторной батареи после теплового разгона.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. *Bajolle H., Lagadic M., Louvet N.* The future of lithium-ion batteries: Exploring expert conceptions, market trends, and price scenarios // *Energy Research and Social Science*. 2022. No. 93. P. 102850. DOI: 10.1016/j.erss.2022.102850. EDN MRAUUQ.
2. *Catenacci M., Verdolini E., Bosetti V., Fiorese G.* Going electric: Expert survey on the future of battery technologies for electric vehicles // *Energy Policy*. 2013. No. 61. Pp. 403–413. DOI: 10.1016/j.enpol.2013.06.078
3. *Spotnitz R., Franklin J.* Abuse behavior of high-power, lithium-ion cells // *Journal of Power Sources*. 2003. No. 113 (1). Pp. 81–101. DOI: 10.1016/S0378-7753(02)00488-3. EDN BCZJGB.
4. *Galushkin N.E., Yazvinskaya N.N., Galushkin D.N.* Causes and mechanism of thermal runaway in lithium-ion batteries, contradictions in the generally accepted mechanism // *Journal of Energy Storage*. 2024. No. 86. P. 111372. DOI: 10.1016/j.est.2024.111372. EDN ZWGUHD.
5. *Серцова А.А., Красильников С.В.* Разработка функциональных пожаротушающих материалов для защиты литий-ионных аккумуляторов // *Актуальные проблемы пожарной безопасности : мат. XXXV Междунар. науч.-практ. конф.* М., 2023. С. 561–568. EDN BZEZYY.
6. *He D., Wang J., Peng Ya., Li B., Feng Ch., Shen L. et al.* Research advances on thermal runaway mechanism of lithium-ion batteries and safety improvement // *Sustainable Materials and Technologies*. 2024. No. 41. P. e01017. DOI: 10.1016/j.susmat.2024.e01017. EDN JSLMEH.
7. *Kolbasov A.F., Endachev D.V., Olkhovskiy I.A., Dvoenko O.V.* Issues of operational and environmental safety in the aftermath of an accident of vehicles with high-voltage components // *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*. 2021 International Symposium “Earth Sciences: History, Contemporary Issues and Prospects, ESHCIP 2021”. IOP Publishing Ltd, 2021. P. 012093. DOI: 10.1088/1755-1315/867/1/012093. EDN QIXNAJ.
8. *Kolbasov A.F., Karpukhin K., Dvoenko O.V., Olkhovskiy I.A.* The main approaches to the system of fire extinguishing and elimination of consequences of accidents of electric vehicles // *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*. 2021 International Symposium “Earth Sciences: History, Contemporary Issues and Prospects, ESHCIP 2021”. IOP Publishing Ltd, 2021. P. 012092. DOI: 10.1088/1755-1315/867/1/012092. EDN JWTTXC.
9. *Ouyang D., Weng J., Wang Zh., Wang J., Chen M., Huang Q.A.* Review on the Thermal Hazards of the Lithium-Ion Battery and the Corresponding Countermeasures // *Applied Sciences*. 2019. No. 9 (12). P. 483. DOI: 10.3390/app9122483. EDN VNYHQQ.
10. *Харламенков А.С.* Системы защиты ячеек и батарейных блоков с литий-ионными аккумуляторами. Часть 1 // *Пожаровзрывобезопасность/Fire and explosion safety*. 2022. № 30 (4). С. 76–79. EDN KPOESB.
11. *Qin P., Sun J., Yang X., Wang Q.* Battery thermal management system based on the forced-air convection : a review // *eTransportation*. 2021. No. 7. P. 100097. DOI: 10.1016/j.etrans.2020.100097
12. *Wu W., Wang S., Wu Wei, Chen K., Hong S., Lai Y.* A critical review of battery thermal performance and liquid based battery thermal management // *Energy Conversion and Management*. 2019. No. 182. Pp. 262–281. DOI: 10.1016/j.enconman.2018.12.051. EDN AHUJOD.
13. *Wang H., Guo Ya., Ren Y., Yeboah S., Wang J., Long F. et al.* Investigation of the thermal management potential of phase change material for lithium-ion battery // *Applied Thermal Engineering*. 2024. No. 236. P. 121590. DOI: 10.1016/j.applthermaleng.2023.121590. EDN LHASQV.
14. *Mahmud Md., Rahman K.S., Rokonzaman Md., Habib A.K.M.A., Islam Md R., Motakabber S.M.A. et al.* Lithium-ion battery thermal management for electric vehicles using phase change material : a review // *Results in Engineering*. 2023. No. 20. P. 101424. DOI: 10.1016/j.rineng.2023.101424. EDN MQETDN.
15. *Харламенков А.С.* Системы защиты ячеек и батарейных блоков с литий-ионными аккумуляторами. Часть 2 // *Пожаровзрывобезопасность/Fire and explosion safety*. 2022. № 31 (5). С. 83–86. EDN LMPEPG.
16. *Серцова А.А., Красильников С.В.* Микрокапсулированные огнетушащие агенты и функциональные материалы на их основе для защиты литий-ионных аккумуляторов // *Огнезащита материалов и конструкций SPBPU FPM-2023 : сб. тезисов докладов I Междунар. науч.-практ. конф.* 2023. С. 153–155. EDN HWUHAC.

17. Orendorff Ch.J., Roth E.P., Nagasubramanian G. Experimental triggers for internal short circuits in lithium-ion cells // *Journal of Power Sources*. 2011. No. 196 (15). Pp. 6554–6558. DOI: 10.1016/j.jpowsour.2011.03.035
18. Zhang L., Jin K., Sun J., Wang Q. A Review of Fire-Extinguishing Agents and Fire Suppression Strategies for Lithium-Ion Batteries Fire // *Fire Technology*. 2022. No. 60. Pp. 817–858. DOI: 10.1007/s10694-022-01278-3
19. Харламенков А.С. Современные способы тушения литий-ионных аккумуляторов. Часть 1 // *Пожаровзрывобезопасность/Fire and explosion safety*. 2023. № 32 (1). С. 89–96. EDN NDGMU.
20. Si Rong-jun, Liu De-qi, Xue Shao-qian. Experimental Study on Fire and Explosion Suppression of Self-ignition of Lithium Ion Battery // *Procedia Engineering*. 2018. No. 211. Pp. 629–634. DOI: 10.1016/j.proeng.2017.12.057
21. Liu Y., Duan Q., Xu J., Chen H., Lu W., Wang Q. Experimental study on the efficiency of dodecafluoro-2-methylpentan-3-one on suppressing lithium-ion battery fires // *RSC Advances*. 2018. No. 8 (73). Pp. 42223–42232. DOI: 10.1039/C8RA08908F
22. Wang H., Sun Q., Guo Ju., Xie S., He Yu., Chen X. The Efficiency of Aqueous Vermiculite Dispersion Fire Extinguishing Agent on Suppressing Three Typical Power Batteries // *Journal of Electrochemical Energy Conversion and Storage*. 2021. No. 18 (2). P. 020901. DOI: 10.1115/1.4048368. EDN AHECZO.
23. Pagliaro J.L., Linteris G.T. Hydrocarbon flame inhibition by C₆F₁₂O (Novec 1230): Unstretched burning velocity measurements and predictions // *Fire Safety Journal*. 2017. No. 87. Pp. 10–17. DOI: 10.1016/j.firesaf.2016.11.002
24. Said A.O., Stoliarov S.I. Analysis of effectiveness of suppression of lithium ion battery fires with a clean agent // *Fire Safety Journal*. 2021. No. 121. P. 103296. DOI: 10.1016/j.firesaf.2021.103296. EDN MPWPYZ.
25. Liang Ch., Jin K., Liu P., Wang Ch., Xu J., Li H. et al. The Efficiency of Perfluorohexanone on Suppressing Lithium-Ion Battery Fire and Its Device Development // *Fire Technology*. 2023. No. 59 (3). Pp. 1283–1301. DOI: 10.1007/s10694-023-01365-z. EDN CXOZBK.
26. Han Zh., Zhang X., Yu Yu., Du Zh., Hwang H.-Y., Liu L.L. et al. Experimental Investigation of Fire Extinguishing of a Full-Size Battery Box with FK-5-1-12 // *Fire Technology*. 2022. No. 59. Pp. 1269–1282. DOI: 10.1007/s10694-022-01273-8
27. Sun H., Zhang L., Duan Q., Wang Sh., Sun Sh., Sun J. et al. Experimental study on suppressing thermal runaway propagation of lithium-ion batteries in confined space by various fire extinguishing agents // *Process Safety and Environmental Protection: Transaction of the institution of chemical engineers, part B*. 2022. No. 167. Pp. 299–307. DOI: 10.1016/j.psep.2022.09.016. EDN PWZJZG.
28. Wang Q., Li K., Wang Y., Chen H., Duan Q., Sun J. The Efficiency of Dodecafluoro-2-Methylpentan-3-One on Suppressing the Lithium Ion Battery Fire // *Journal of Electrochemical Energy Conversion and Storage*. 2018. No. 15 (4). P. 041001. DOI: 10.1115/1.4039418
29. Zhang L., Ye F., Li Y., Chen M., Meng X., Xu J. et al. Experimental Study on the Efficiency of Dodecafluoro-2-Methylpentan-3-One on Suppressing Large-Scale Battery Module Fire // *Fire Technology*. 2022. No. 59. Pp. 1247–1267. DOI: 10.1007/s10694-022-01322-2
30. Lebkowski A. Electric Vehicle Fire Extinguishing System // *Przegląd Elektrotechniczny*. 2017. No. 93 (1). Pp. 329–332. DOI: 10.15199/48.2017.01.77
31. Guo Y., Wang X., Gao J., He Zh., Yao S., Zhou X. et al. In situ extinguishing mechanism and performance of self-portable microcapsule fire extinguishing agent for lithium-ion batteries // *Journal of Energy Storage*. 2024. No. 93. P. 112393. DOI: 10.1016/j.est.2024.112393. EDN CYKPRS.
32. Sertsova A., Krasilnikov S., Lee S-S., Kim J-S. The effect of epoxy resin on the properties of encapsulated fire extinguishing agent // *Fire Science and Engineering*. 2019. No. 33 (5). Pp. 19–27. DOI: 10.7731/KIFSE.2019.33.5.019
33. Zhang W., Wu L., Du J., Tian J., Li Ya., Zhao Y. et al. Fabrication of a microcapsule extinguishing agent with a core-shell structure for lithium-ion battery fire safety // *Materials Advances*. 2021. No. 2 (14). Pp. 4634–4642. DOI: 10.1039/d1ma00343g. EDN CYYING.
34. Yuan L., Dubaniewicz T., Zlochower I., Thomas R., Rayyan N. Experimental study on thermal runaway and vented gases of lithium-ion cells // *Process Safety and Environmental Protection: transaction of the institution of chemical engineers, part B*. 2020. No. 144. Pp. 186–192. DOI: 10.1016/j.psep.2020.07.028. EDN ZDEYFW.
35. Seo D.M., Chalasani D., Parimalam B.S., Kadam R., Nie M., Lucht B.L. Reduction Reactions of Carbonate Solvents for Lithium Ion Batteries // *ECS Electrochemistry Letters*. 2014. No. 3 (9). Pp. 91–93. DOI: 10.1149/2.0021409
36. Yoshida H., Fukunaga T., Hazama T., Terasaki M., Mizutani M., Yamachi M. Degradation mechanism of alkyl carbonate solvents used in lithium-ion cells during initial charging // *Journal of Power Sources*. 1997. No. 68 (2). Pp. 311–315. DOI: 10.1016/S0378-7753(97)02635-9. EDN AJDYDF.
37. Shurtz R.C. A Thermodynamic Reassessment of Lithium-Ion Battery Cathode Calorimetry // *Journal of The Electrochemical Society*. 2020. No. 167 (14). P. 140544. DOI: 10.1149/1945-7111/abc7b4. EDN CQQTIJ.

REFERENCES

1. Bajolle H., Lagadic M., Louvet N. The future of lithium-ion batteries: Exploring expert conceptions, market trends, and price scenarios. *Energy Research and Social Science*. 2022; 93:102850. DOI: 10.1016/j.erss.2022.102850. EDN MRAUQ.
2. Catenacci M., Verdolini E., Bosetti V., Fiorese G. Going electric: Expert survey on the future of battery technologies for electric vehicles. *Energy Policy*. 2013; 61:403-413. DOI: 10.1016/j.enpol.2013.06.078
3. Spotnitz R., Franklin J. Abuse behavior of high-power, lithium-ion cells. *Journal of Power Sources*. 2003; 113(1):81-101. DOI: 10.1016/S0378-7753(02)00488-3. EDN BCZJGB.
4. Galushkin N.E., Yazvinskaya N.N., Galushkin D.N. Causes and mechanism of thermal runaway in lithium-ion batteries, contradictions in the generally accepted mechanism. *Journal of Energy Storage*. 2024; 86:111372. DOI: 10.1016/j.est.2024.111372. EDN ZWGUHD.
5. Sertsova A.A., Krasilnikov S.V. Functional fire extinguishing materials to protect lithium-ion batteries. Current issues of fire safety : *Proceeding of the XXXV International scientific and practical conference*. Moscow, 2023; 561-568. EDN BZEZYY. (rus.).
6. He D., Wang J., Peng Ya., Li B., Feng Ch., Shen L. et al. Research advances on thermal runaway mechanism of lithium-ion batteries and safety improvement. *Sustainable Materials and Technologies*. 2024; 41:e01017. DOI: 10.1016/j.susmat.2024.e01017. EDN JSLMEH.
7. Kolbasov A.F., Endachev D.V., Olkhovsky I.A., Dvoenko O.V. Issues of operational and environmental safety in the aftermath of an accident of vehicles with high-voltage components. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science. 2021 International Symposium "Earth Sciences: History, Contemporary Issues and Prospects, ESHCIP 2021"*. IOP Publishing Ltd, 2021; 012093. DOI: 10.1088/1755-1315/867/1/012093. EDN QIXNAJ.
8. Kolbasov A.F., Karpukhin K., Dvoenko O.V., Olkhovsky I.A. The main approaches to the system of fire extinguishing and elimination of consequences of accidents of electric vehicles. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science. 2021 International Symposium "Earth Sciences: History, Contemporary Issues and Prospects, ESHCIP 2021"*. IOP Publishing Ltd, 2021; 012092. DOI: 10.1088/1755-1315/867/1/012092. EDN JWTTXC.
9. Ouyang D., Weng J., Wang Zh., Wang J., Chen M., Huang Q.A. Review on the Thermal Hazards of the Lithium-Ion Battery and the Corresponding Countermeasures. *Applied Sciences*. 2019; 9(12): 483. DOI: 10.3390/app9122483. EDN VNYHQQ.
10. Kharlamenkov A.S. Systems for protecting cells and batteries with lithium-ion batteries. Part 1. *Pozharovzryvobezopasnost/Fire and explosion safety*. 2022; 30(4):76-79. EDN KPOESB. (rus).
11. Qin P., Sun J., Yang X., Wang Q. Battery thermal management system based on the forced-air convection : a review. *eTransportation*. 2021; 7:100097. DOI: 10.1016/j.etrans.2020.100097
12. Wu W., Wang S., Wu Wei, Chen K., Hong S., Lai Y. A critical review of battery thermal performance and liquid based battery thermal management. *Energy Conversion and Management*. 2019; 182:262-281. DOI: 10.1016/j.enconman.2018.12.051. EDN AHUJOD.
13. Wang H., Guo Ya., Ren Y., Yeboah S., Wang J., Long F. et al. Investigation of the thermal management potential of phase change material for lithium-ion battery. *Applied Thermal Engineering*. 2024; 236:121590. DOI: 10.1016/j.applthermaleng.2023.121590. EDN LHASQV.
14. Mahmud Md., Rahman K.S., Rokonuzzaman Md., Habib A.K.M.A., Islam Md R., Motakabber S.M.A. et al. Lithium-ion battery thermal management for electric vehicles using phase change material : a review. *Results in Engineering*. 2023; 20:101424. DOI: 10.1016/j.rineng.2023.101424. EDN MQETDN.
15. Kharlamenkov A.S. Systems for protecting cells and batteries with lithium-ion batteries. Part 2. *Pozharovzryvobezopasnost'/Fire and explosion safety*. 2022; 31(5):83-86. EDN LMPEPG.
16. Sertsova A.A., Krasilnikov S.V. Microencapsulated fire extinguishing agents and functional materials based on them for the protection of lithium-ion batteries. *Fire Protection of Materials and Structures SPBPU FPM-2023 : Collection of abstracts of reports from the 1st international scientific and practical conference*. St. Petersburg, 2023; 153-155. EDN HWUHAC. (rus).
17. Orendorff Ch.J., Roth E.P., Nagasubramanian G. Experimental triggers for internal short circuits in lithium-ion cells. *Journal of Power Sources*. 2011; 196(15):6554-6558. DOI: 10.1016/j.jpowsour.2011.03.035
18. Zhang L., Jin K., Sun J., Wang Q. A Review of Fire-Extinguishing Agents and Fire Suppression Strategies for Lithium-Ion Batteries Fire. *Fire Technology*. 2022; 60:817-858. DOI: 10.1007/s10694-022-01278-3
19. Kharlamenkov A.S. Advanced methods of extinguishing lithium-ion batteries. Part 1. *Pozharovzryvobezopasnost'/Fire and Explosion Safety*. 2023; 32(1):89-96. EDN NDGMYU. (rus).
20. Si Rong-jun, Liu De-qi, Xue Shao-qian. Experimental Study on Fire and Explosion Suppression of Self-ignition of Lithium Ion Battery. *Procedia Engineering*. 2018; 211:629-634. DOI: 10.1016/j.proeng.2017.12.057

21. Liu Y., Duan Q., Xu J., Chen H., Lu W., Wang Q. Experimental study on the efficiency of dodecafluoro-2-methylpentan-3-one on suppressing lithium-ion battery fires. *RSC Advances*. 2018; 8(73):42223-42232. DOI: 10.1039/C8RA08908F
22. Wang H., Sun Q., Guo Ju., Xie S., He Yu., Chen X. The Efficiency of Aqueous Vermiculite Dispersion Fire Extinguishing Agent on Suppressing Three Typical Power Batteries. *Journal of Electrochemical Energy Conversion and Storage*. 2021; 18(2):020901. DOI: 10.1115/1.4048368. EDN AHECZO.
23. Pagliaro J.L., Linteris G.T. Hydrocarbon flame inhibition by C₆F₁₂O (Novec 1230): Unstretched burning velocity measurements and predictions. *Fire Safety Journal*. 2017; 87:10-17. DOI: 10.1016/j.firesaf.2016.11.002
24. Said A.O., Stoliarov S.I. Analysis of effectiveness of suppression of lithium ion battery fires with a clean agent. *Fire Safety Journal*. 2021; 121:103296. DOI: 10.1016/j.firesaf.2021.103296. EDN MPWPYZ.
25. Liang Ch., Jin K., Liu P., Wang Ch., Xu J., Li H. et al. The Efficiency of Perfluorohexanone on Suppressing Lithium-Ion Battery Fire and Its Device Development. *Fire Technology*. 2023; 59(3):1283-1301. DOI: 10.1007/s10694-023-01365-z. EDN CXOZBK.
26. Han Zh., Zhang X., Yu Yu., Du Zh., Hwang H.-Y., Liu L.L. et al. Experimental Investigation of Fire Extinguishing of a Full-Size Battery Box with FK-5-1-12. *Fire Technology*. 2022; 59:1269-1282. DOI: 10.1007/s10694-022-01273-8
27. Sun H., Zhang L., Duan Q., Wang Sh., Sun Sh., Sun J. et al. Experimental study on suppressing thermal runaway propagation of lithium-ion batteries in confined space by various fire extinguishing agents. *Process Safety and Environmental Protection: Transaction of the institution of chemical engineers, part B*. 2022; 167:299-307. DOI: 10.1016/j.psep.2022.09.016. EDN PWZJZG.
28. Wang Q., Li K., Wang Y., Chen H., Duan Q., Sun J. The Efficiency of Dodecafluoro-2-Methylpentan-3-One on Suppressing the Lithium Ion Battery Fire. *Journal of Electrochemical Energy Conversion and Storage*. 2018; 15(4):041001. DOI: 10.1115/1.4039418
29. Zhang L., Ye F., Li Y., Chen M., Meng X., Xu J. et al. Experimental Study on the Efficiency of Dodecafluoro-2-Methylpentan-3-One on Suppressing Large-Scale Battery Module Fire. *Fire Technology*. 2022; 59:1247-1267. DOI: 10.1007/s10694-022-01322-2
30. Lebkowski A. Electric Vehicle Fire Extinguishing System. *Przegląd Elektrotechniczny*. 2017; 93(1):329-332. DOI: 10.15199/48.2017.01.77
31. Guo Y., Wang X., Gao J., He Zh., Yao S., Zhou X. et al. In situ extinguishing mechanism and performance of self-portable microcapsule fire extinguishing agent for lithium-ion batteries. *Journal of Energy Storage*. 2024; 93:112393. DOI: 10.1016/j.est.2024.112393. EDN CYKPRS.
32. Sertsova A., Krasilnikov S., Lee S-S., Kim J-S. The effect of epoxy resin on the properties of encapsulated fire extinguishing agent. *Fire Science and Engineering*. 2019; 33(5):19-27. DOI: 10.7731/KIFSE.2019.33.5.019
33. Zhang W., Wu L., Du J., Tian J., Li Ya., Zhao Y. et al. Fabrication of a microcapsule extinguishing agent with a core-shell structure for lithium-ion battery fire safety. *Materials Advances*. 2021; 2(14):4634-4642. DOI: 10.1039/d1ma00343g. EDN CYYING.
34. Yuan L., Dubaniewicz T., Zlochower I., Thomas R., Rayyan N. Experimental study on thermal runaway and vented gases of lithium-ion cells. *Process Safety and Environmental Protection: transaction of the institution of chemical engineers, part B*. 2020; 144:186-192. DOI: 10.1016/j.psep.2020.07.028. EDN ZDEYFW.
35. Seo D.M., Chalasani D., Parimalam B.S., Kadam R., Nie M., Lucht B.L. Reduction Reactions of Carbonate Solvents for Lithium Ion Batteries. *ECS Electrochemistry Letters*. 2014; 3(9):91-93. DOI: 10.1149/2.0021409
36. Yoshida H., Fukunaga T., Hazama T., Terasaki M., Mizutani M., Yamachi M. Degradation mechanism of alkyl carbonate solvents used in lithium-ion cells during initial charging. *Journal of Power Sources*. 1997; 68(2):311-315. DOI: 10.1016/S0378-7753(97)02635-9. EDN AJDYDF.
37. Shurtz R.C. A Thermodynamic Reassessment of Lithium-Ion Battery Cathode Calorimetry. *Journal of The Electrochemical Society*. 2020; 167(14):140544. DOI: 10.1149/1945-7111/abc7b4. EDN CQQTJJ.

Поступила 06.09.2024, после доработки 19.08.2025;

принята к публикации 20.08.2025

Received September 06, 2024; Received in revised form August 19, 2025;

Accepted August 20, 2025

Информация об авторах

ЯКУНОВ Дмитрий Михайлович, начальник сектора функционального тестирования накопителей энергии, Государственный научный центр Российской Федерации «Центральный ордена Трудового Красного Знамени научно-исследовательский автомобильный и автомоторный институт «НАМИ»», Россия, 125438, г. Москва, ул. Автомоторная, 2; ORCID: 0009-0003-6230-3787; e-mail: dmitry.yakunov@nami.ru

СЕРЦОВА Александра Анатольевна, к.х.н., генеральный директор, ООО «МФА ТЕХ», Россия, 117105, г. Москва, ул. Нагатинская, 3А, стр. 5, оф. 428; ORCID: 0000-0001-8275-7944; ResearcherID: AAK-1619-2021; AuthorID: 35099465500; e-mail: sertsova.aa@mfacech.ru

КРАСИЛЬНИКОВ Сергей Валерьевич, технический директор, ООО «МФА ТЕХ», Россия, 117105, г. Москва, ул. Нагатинская, 3А, стр. 5, оф. 428; ORCID: 0009-0004-3276-4037; AuthorID: 53866562800; e-mail: krozenhover@gmail.com

КОЛБАСОВ Алексей Федорович, к.т.н., начальник отдела лабораторных испытаний и сертификации, Дирекция по развитию электротранспортных средств, ГУП «Московский метрополитен», Россия, 121351, г. Москва, ул. Ивана Франко, 14; ORCID: 0000-0001-5259-5059; e-mail: KolbasovAF1@transport.mos.ru

ДВОЕНКО Олег Викторович, к.т.н., доцент, начальник кафедры пожарной техники, Академия Государственной противопожарной службы Министерства Российской Федерации по делам гражданской обороны, чрезвычайным ситуациям и ликвидации последствий стихийных бедствий, Россия, 129366, г. Москва, ул. Бориса Галушкина, 4; SPIN-код: 2013-9651; ORCID: 0000-0002-0436-4974; AuthorID: 57321841400; e-mail: dvoenko_oleg@mail.ru

Вклад авторов:

Якунов Д.М. — планирование исследований; подготовка экспериментов; написание научной статьи.

Серцова А.А. — анализ и обобщение данных литературы; подготовка и проведение экспериментов; написание научной статьи.

Красильников С.В. — подготовка экспериментов; анализ и систематизация экспериментальных данных; написание научной статьи.

Колбасов А.Ф. — организация и проведение испытаний; написание научной статьи.

Двоенко О.В. — развитие методологии; подготовка и проведение экспериментов; итоговые выводы.

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Information about the authors

Dmitry M. YAKUNOV, Head of the Sector for Functional Testing of Energy Storage System, State Research Center of the Russian Federation Central Research Institute of Automobiles and Motor Vehicles “NAMI”; Automotornaya St., 2, Moscow, 125438, Russian Federation; ORCID: 0009-0003-6230-3787; e-mail: dmitry.yakunov@nami.ru

Alexandra A. SERTSOVA, Cand. Sci. (Chem.), Chief Executive Officer, LLC “MFA TECH”, Nagatinskaya St., 3A, build. 5, office 428, Moscow, 117105, Russian Federation; ORCID: 0000-0001-8275-7944; ResearcherID: AAK-1619-2021; AuthorID: 35099465500; e-mail: sertsova.aa@mfacech.ru

Sergey V. KRASILNIKOV, Chief Technical Officer, LLC “MFA TECH”, Nagatinskaya St., 3A, build. 5, office 428, Moscow, 117105, Russian Federation; ORCID: 0009-0004-3276-4037; AuthorID: 53866562800; e-mail: krozenhover@gmail.com

Alexey F. KOLBASOV, Cand. Sci. (Eng.), Head of Laboratory Testing and Certification Department Directorate for Development of Electric Vehicles, SUE “Moscow Metro”, Ivan Franko St., 14, Moscow, 121351, Russian Federation; ORCID: 0000-0001-5259-5059; AuthorID: 57198424244; e-mail: KolbasovAF1@transport.mos.ru

Oleg V. DVOENKO, Cand. Sci. (Eng.), Docent, Head of Department of the Fire Fighting Equipment, 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; SPIN-code: 2013-9651; ORCID: 0000-0002-0436-4974; AuthorID: 57321841400; e-mail: dvoenko_oleg@mail.ru

Contribution of the authors:

Yakunov D.M. — research planning; preparation of experiments; writing of a scientific article.

Sertsova A.A. — analysis and generalization of literature data; preparation and performing of experiments; writing of a scientific article.

Krasilnikov S.V. — preparation of experiments; analysis and systematization of experimental data; preparation and conduct of experiments; writing of a scientific article.

Kolbasov A.F. — organization and performing of experiments; writing of a scientific article.

Dvoenko O.V. — methodology development; organization and performing of experiments; final conclusions.

The authors declare that there is no conflict of interest.

Экспериментальные исследования способа подачи газопорошкового огнетушащего вещества с помощью щелевого насадка при тушении пролива горючей жидкости

Александра Борисовна Саенкова ✉

ООО «Каланча Инжиниринг», г. Сергиев Посад, Россия

АННОТАЦИЯ

Введение. Статья посвящена изучению методов повышения эффективности тушения пожаров, вызванных проливами горючих жидкостей. Цель работы — определение оптимального способа подачи газопорошкового огнетушащего вещества (ГПОВ) через щелевой насадок распыления. В задачи исследования входило изучение влияния расположения насадка, интенсивности подачи ГПОВ и площади очага возгорания на эффективность тушения.

Методы. В исследовании применялись экспериментальные методы, включающие моделирование очагов возгорания различной конфигурации. Для подачи ГПОВ использовался щелевой насадок распыления, закрепленный на определенном расстоянии от борта модельного очага. Коэффициент диафрагмирования насадка рассчитывался как соотношение площади боковой прорези к площади проходного сечения трубопровода подачи ГПОВ.

Результаты. Экспериментальные исследования показали, что тушение пролива горючей жидкости достигается при интенсивности подачи ГПОВ более $1,4 \text{ кг}/(\text{м}^2\cdot\text{с})$. Верная струя, создаваемая щелевым насадком, должна полностью перекрыть площадь возгорания.

Область применения результатов. Полученные результаты могут быть использованы для разработки более эффективных систем пожаротушения для промышленных объектов, где возможны проливы горючих жидкостей. Результаты исследования имеют практическую значимость для повышения безопасности объектов нефтегазовой отрасли.

Выводы. Исследование показало эффективность щелевого насадка распыления для тушения проливов горючих жидкостей. Для дальнейшего повышения эффективности тушения необходимо учитывать расположение насадка, массовую скорость подачи и интенсивность ГПОВ. Перспективным направлением является изучение механизма формирования зоны с огнетушащей концентрацией ГПОВ над поверхностью пролива.

Ключевые слова: пожаротушение; интенсивность подачи; экспериментальное исследование

Для цитирования: Саенкова А.Б. Экспериментальные исследования способа подачи газопорошкового огнетушащего вещества с помощью щелевого насадка при тушении пролива горючей жидкости // Пожаровзрывобезопасность/Fire and Explosion Safety. 2025. Т. 34. № 5. С. 63-70. DOI: 10.22227/0869-7493.2025.34.05.63-70

✉ Саенкова Александра Борисовна, e-mail: a.saenkova@gmail.com

Experimental study of gas-powder fire extinguishing agent application via a slotted nozzle for pool fire suppression

Alexandra B. Saenkova ✉

Kalancha Engineering LLC, Sergiev Posad, Russian Federation

ABSTRACT

Subject. The article addresses methods for enhancing the effectiveness of extinguishing fires caused by spills of flammable liquids. The study aims to determine the optimal parameters for supplying a gas-powder fire-extinguishing agent (GPFEA) through a slotted spray nozzle.

Objectives. The objectives of the research include analysing the influence of the nozzle position, GPFEA discharge rate, and fire area size on the extinguishing efficiency.

Methods. Experimental studies were conducted using simulated fire sources of various configurations. A slotted spray nozzle, positioned at a fixed distance from the edge of the model fire source, was employed to supply the GPFEA. The diaphragm coefficient of the nozzle was determined as the ratio of the lateral slot area to the cross-sectional area of the GPFEA supply line.

Results. The experiments demonstrated that effective extinguishing of flammable liquid spills is achieved when the GPFEA discharge intensity exceeds $1.4 \text{ kg}/(\text{m}^2\cdot\text{s})$. The fan-shaped jet produced by the slotted nozzle must completely cover the fire area to ensure full suppression.

Practical significance. The obtained results can be applied in the development of more efficient fire suppression systems for industrial facilities where flammable liquid spills may occur. The findings are of practical relevance for improving the safety of oil and gas industry facilities.

Conclusions. The study confirmed the effectiveness of using a slotted spray nozzle for extinguishing flammable liquid spills. To further enhance extinguishing performance, it is essential to consider the nozzle orientation, mass flow rate, and discharge intensity of the GPFEA. Future research should focus on studying the formation mechanism of the zone with a fire-extinguishing concentration of the GPFEA above the spill surface.

Keywords: fire extinguishing; discharge intensity; experimental study; gas-powder fire-extinguishing agent; slotted nozzle

For citation: Saenkova A.B. Experimental study of gas-powder fire-extinguishing agent application via a slotted nozzle for pool fire suppression. *Pozharovzryvobezopasnost/Fire and Explosion Safety*. 2025; 34(5):63-70. DOI: 10.22227/0869-7493.2025.34.05.63-70 (rus).

✉ Alexandra Borisovna Saenkova, e-mail: a.saenkova@gmail.com

Введение

Современные исследования порошковых огнетушащих средств направлены на повышение их эффективности при тушении воспламенения различных горючих веществ и улучшение эксплуатационных свойств.

Создание композитных составов с добавками $Mg(OH)_2$ [1–3], $NH_4Al(SO_4)_2 \cdot 12H_2O$ [4], SiO_2 и хитозан (chitosan) [5] позволяет сократить время тушения и расход по сравнению с уже существующими на рынке огнетушащими порошками. В работе [6] более подробно рассмотрен механизм тушения порошка с добавкой $Mg(OH)_2$. Модификация поверхности порошка позволяет повысить водоотталкивающие свойства порошка [7]. В настоящее время разрабатываются порошки, имеющие одновременно гидрофобные и олеофобные свойства, для тушения пожаров пролива и снижения риска повторного воспламенения [8–10].

Однако существующие способы и средства подачи огнетушащих порошков при тушении пожаров зачастую не позволяют использовать их эффективно [11]. Поэтому важно изучать не только свойства огнетушащих порошков, но и способы их подачи при применении в серийно выпускаемых модулях порошкового и газопорошкового пожаротушения.

Авторы в работах [12–16] рассматривают подачу порошкового огнетушащего вещества через сверхзвуковые насадки с целью оптимизации конструкции насадка для повышения эффективности пожаротушения. Исследователи отмечают влияние геометрии сопла [12, 14], давления подачи [13, 16] на длину струи и распределения твердых частиц порошка по струе. Авторы в работе [13] отмечают следующие зависимости: увеличение размера частиц до 10–20 мкм уменьшает скорость в ядре струи и уменьшает радиальную диффузию; увеличение массового расхода порошка снижает скорость частиц в ядре струи, но увеличивает их радиальную диффузию; увеличение давления в сопле приводит к увеличению скорости частиц и длины ядра струи.

Автор в работах [17–20] рассматривает подачу порошка с помощью импульсных порошковых моду-

лей, расположенных непосредственно над очагом пожара. Динамика частиц огнетушащего порошка при таком способе подачи зависит от множества факторов: мощности очага пожара, подъемной силы нагретых газов, сопротивления воздуха, интенсивности подачи порошка, скорости частиц и их теплофизических свойств. При некоторой высоте расположения модуля пожаротушения часть частиц порошка не будет обладать достаточной скоростью, чтобы достичь очага возгорания [20].

Одним из способов тушения пролива горючей жидкости является создание над ее поверхностью слоя с огнетушащей концентрацией порошка. Струя, создаваемая с помощью сопел круглого сечения, имеет коническую форму и не может перекрыть всю поверхность пролива одновременно. При истечении среды из кольцевого сопла образуется веерная струя [21]. На практике такую струю можно получить при истечении среды из узкой щели в боковой поверхности трубы, один конец которой заглушен. Гипотеза экспериментального исследования состоит в том, что с помощью щелевого насадка можно создать струю ГПОВ над поверхностью пролива. Скорость истечения ГПОВ будет выше скорости восходящих потоков пламени, а время работы модуля достаточным для тушения. При этом над всей площадью возгорания будет формироваться зона с концентрацией ГПОВ не менее огнетушащей.

Цель исследования состоит в определении оптимального способа подачи при тушении сплошного пролива горючей жидкости через щелевой насадок распыления. Задачи исследования состоят в определении оптимального расположения насадка распыления относительно борта модельного очага, экспериментального определения площади очага, который может быть потушен с помощью такого насадка распыления и интенсивности подачи газопорошкового огнетушащего вещества.

Методика исследования

Общая схема испытаний представлена на рис. 1. Для исследования использовались модельные очаги

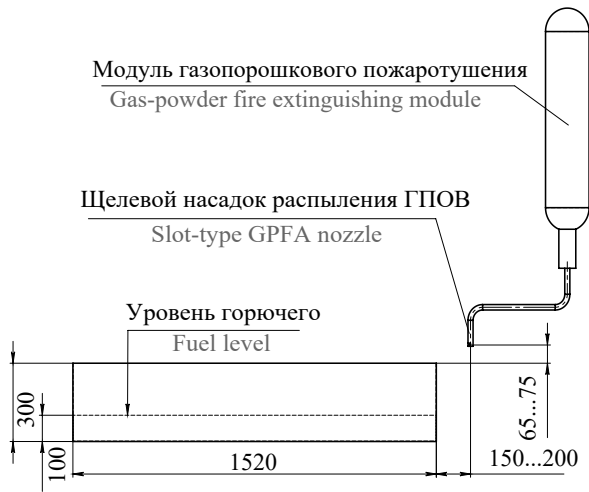


Рис. 1. Общая схема испытания
Fig. 1. General test layout

различной конфигурации: прямоугольный очаг с размерами 1 × 2 м, квадратный очаг с размерами 1,52 × 1,52 м и стандартные модельные очаги 89В, 144В и 233В по ГОСТ Р 53286–2009¹. Насадок распыления закреплялся на расстоянии от борта модельного очага. Насадок распыления (рис. 2, 3) через трубопровод соединялся с модулем газопорошкового пожаротушения. Коэффициент диафрагмирования насадка определялся как соотношение площади боковой прорези щелевого насадка к площади проходного сечения трубопровода подачи ГПОВ. Глубина прорези r щели составляла половину диаметра трубы. Ширина прорези h выбиралась с таким условием, чтобы коэффициент диафрагмирования насадка составлял 0,7.

$$k_d = \frac{S_{щ}}{S_{тр}} = \frac{2 \cdot \frac{1}{2} \cdot \pi \cdot r \cdot h}{\pi \cdot r^2} = \frac{h}{r} \approx 0,7, \quad (1)$$

где k_d — коэффициент диафрагмирования насадка распыления;

$S_{щ}$ — площадь боковой прорези щелевого насадка распыления, м²;

$S_{тр}$ — площадь проходного сечения трубопровода подачи ГПОВ, м²;

r — радиус внутреннего сечения трубопровода подачи ГПОВ, м;

h — ширина боковой прорези щелевого насадка распыления ГПОВ, м.

Подача ГПОВ велась из одного щелевого насадка.

Дополнительно были проведены испытания, в которых подача ГПОВ велась через два насадка распыления, расположенных напротив друг друга и соединенных единым трубопроводом с модулем пожаротушения.

¹ ГОСТ Р 53286–2009. Техника пожарная. Установки порошкового пожаротушения автоматические. Модули. Общие технические требования. Методы испытаний.

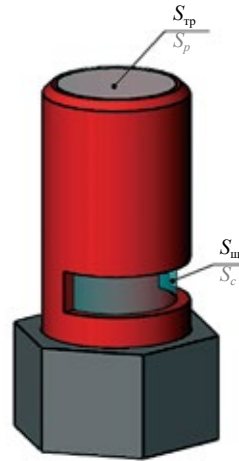


Рис. 2. Общий вид щелевого насадка распыления ГПОВ
Fig. 2. General design of the slot-type GPFEA nozzle

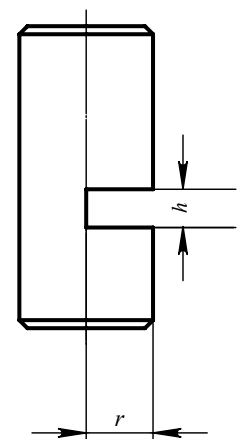


Рис. 3. Вид сбоку щелевого насадка распыления ГПОВ
Fig. 3. Side view of GPFEA slot-type spray nozzle

Для определения времени выхода ГПОВ и давления подачи ГПОВ на трубопроводе перед насадком распыления был установлен датчик давления, данные с которого с помощью преобразователя регистрировались и обрабатывались на ЭВМ.

В модельный очаг заливалась вода и затем горячая жидкость. Расстояние от поверхности жидкости до края борта составляло 100–150 мм. Горючее поджигалось с помощью факела, и через 60 с свободного горения вручную запускался модуль пожаротушения. По результатам фиксировались тушение и отсутствие повторного воспламенения, велась видеосъемка.

Результаты

Был проведен ряд испытаний, в которых менялись масса ГПОВ и, соответственно, проходное сечение трубопровода ГПОВ и высота щели насадка распыления. Для увеличения интенсивности подачи

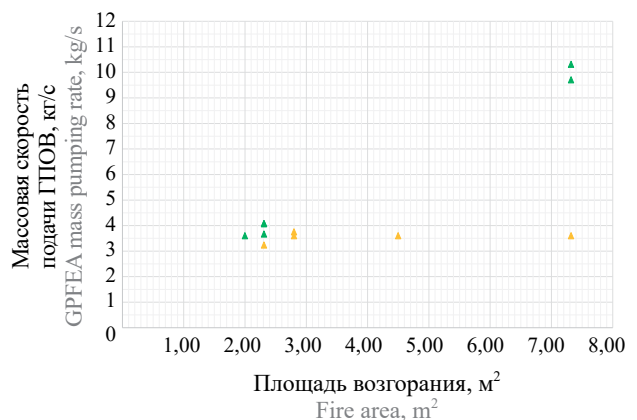


Рис. 4. Зависимость массовой скорости подачи ГПОВ от площади возгорания: ▲ возгорание потушено; ▲ возгорание не потушено

Fig. 4. Dependence of the GPFEA mass pumping rate on the fire area: ▲ fire extinguished; ▲ fire not extinguished

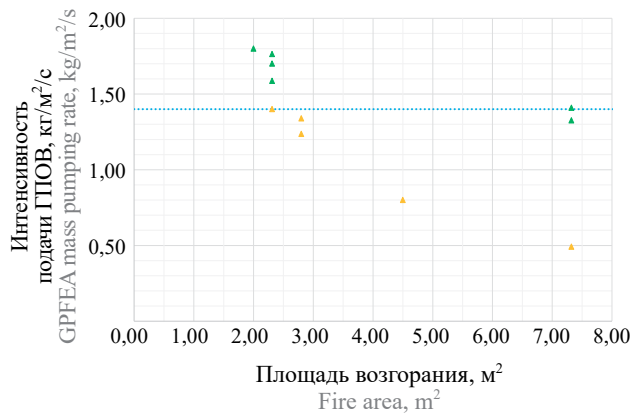


Рис. 5. Зависимость интенсивности подачи ГПОВ от площади возгорания: ▲ возгорание потушено; ▲ возгорание не потушено

Fig. 5. Dependence of the GPFEA discharge rate on the fire area: ▲ fire extinguished; ▲ fire not extinguished



Рис. 7. В испытании № 3 наблюдалось горение у дальнего от насадка борта

Fig. 7. During Test 3, combustion was observed near the far edge of the wall (farthest from the nozzle)



a



b



c

Рис. 6. Испытание № 9: тушение пожара пролива: a — начало подачи ГПОВ; b — раскрытие струи ГПОВ над очагом пожара; c — ликвидация возгорания

Fig. 6. Test 9: pool fire extinguishing: a — onset of GPFA pumping; b — GPFA flow separation over the fire seat; c — fire suppression



a



b



c

Рис. 8. Испытание с двумя насадками распыления ГПОВ: a — начало подачи ГПОВ; b — увеличение объема пламени над очагом пожара; c — ликвидация возгорания

Fig. 8. Dual nozzle GPFEA spray test: a — onset of GPFEA pumping; b — flame increase over the fire seat; c — fire suppression

Результаты огневых испытаний
Fire test results

Наименование параметра Parameter	Ед. изм. Measurement unit	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
Ликвидация возгорания Fire suppression	–	Да Yes	Нет No	Нет No	Нет No	Нет No	Да Yes	Да Yes	Нет No	Да Yes	Да Yes	Да Yes
Модельный очаг Model fire scenario	–	Прямоугольный очаг 1 × 2 м Rectangular fire pan 1 × 2 m	Модельный очаг 233В Model fire scenario 233В	Модельный очаг 144В Model fire scenario 144В	Модельный очаг 89В Model fire scenario 89В	Модельный очаг 89В Model fire scenario 89В	Квадратный очаг 1,52 × 1,52 м Square fire pan 1,52 × 1,52 m	Квадратный очаг 1,52 × 1,52 м Square fire pan 1,52 × 1,52 m	Квадратный очаг 1,52 × 1,52 м Square fire pan 1,52 × 1,52 m	Квадратный очаг 1,52 × 1,52 м Square fire pan 1,52 × 1,52 m	Модельный очаг 233В Model fire scenario 233В	Модельный очаг 233В Model fire scenario 233В
Площадь модельного очага Standard model fire area	м ² m ²	2,00	7,32	4,5	2,8	2,8	2,31	2,31	2,31	2,31	7,32	7,32
Масса ГПОВ GPFEA mass	кг kg	9	9	9	9	9	11	5,5	5,5	11	33	33
Условный диаметр трубопровода подачи и насадка распыления ГПОВ Nominal diameter of supply pipeline and GPFEA nozzle	–	15	15	15	15	15	15	15	15	15	25	25
Время выхода ГПОВ GPFEA discharge time	с s	2,5	2,5	2,5	2,4	2,5	2,7	1,5	1,7	2,8	3,2	3,4
Массовая скорость ГПОВ GPFEA mass flow rate	кг/с kg/s	3,6	3,6	3,6	3,75	3,4	4,07	3,67	3,24	3,93	10,31	9,71
Интенсивность подачи ГПОВ GPFEA discharge rate	кг/м ² /с kg/m ² /s	1,8	0,49	0,8	1,34	1,24	1,76	1,59	1,40	1,70	1,41	1,33

несколько модулей объединялись общим коллектором, площадь проходного сечения которого была равна сумме площадей сечений выходных отверстий модулей. Результаты представлены в таблице и на рис. 4, 5. Массовая скорость ГПОВ определялась как отношение массы ГПОВ к времени выхода ГПОВ. Интенсивность подачи ГПОВ — отношение массы ГПОВ к времени выхода ГПОВ и к площади возгорания. На рис. 6 представлены кадры работы модуля пожаротушения. Веерная струя от щелевого насадка полностью перекрывает площадь возгорания. Происходит отсечение горячей части пламени за счет скорости истечения газопорошковой смеси. Горящая часть поднимается вверх и догорает в атмосфере. Порошок поступает в зону горения, смешивается с парами горючей жидкости и воздухом, ингибирует реакцию горения. Облако ГПОВ при перекрытии площади возгорания препятствует поступлению теплового потока от пламени к горючей жидкости и испарению горючих паров с поверхности жидкости. В опытах 2–5 было визуально видно, что у дальнего относительно насадка распыления борта горение не прекращалось (рис. 7). Можно предположить, что скорость струи ГПОВ на границе борта снизилась, газопорошковая смесь начала подниматься восходящими потоками пламени и не произошло механического срыва пламени. При этом огнетушащая концентрация в данной зоне также не была достигнута.

При испытаниях, когда подача ГПОВ осуществлялась из двух насадков распыления, направленных навстречу друг другу, произошло увеличение объема пламени (рис. 8). Две струи ГПОВ столкнулись над поверхностью горючей жидкости, при этом часть ГПОВ направилась вниз и произошло воздействие

струи ГПОВ на поверхность горючей жидкостью. Произошло «раздувание» паровоздушной смеси, увеличение объема пламени. За счет того, что в зону горения поступило ГПОВ, возгорание было ликвидировано. Подобная картина наблюдалась в двух проведенных опытах.

Выводы

Тушение пожара пролива горючей жидкости происходит при интенсивности подачи ГПОВ более $1,4 \text{ кг}/(\text{м}^2 \cdot \text{с})$.

Щелевой насадок распыления демонстрирует высокую эффективность при тушении проливов горючих жидкостей. Веерная струя, создаваемая таким насадком распыления, способна полностью перекрыть площадь возгорания, что подтверждается экспериментальными данными.

Расположение насадка относительно борта очага играет важную роль в эффективности тушения. В некоторых случаях горение у дальнего относительно насадка распыления борта продолжалось.

Столкновение двух струй ГПОВ и воздействие части порошка на поверхность горения приводит к увеличению объема пламени.

Эффективность тушения зависит от массовой скорости подачи и интенсивности подачи ГПОВ. При этом необходимо учитывать площадь очага, его форму и конструктивные особенности насадка.

Необходимы дальнейшие исследования для определения зависимости скорости распространения струи ГПОВ над поверхностью горения от давления перед насадком распыления ГПОВ и механизма формирования над поверхностью пролива зоны с огнетушащей концентрацией ГПОВ.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Du D., Shen X., Feng L., Hua M., Pan X. Efficiency characterization of fire extinguishing compound superfine powder containing $\text{Mg}(\text{OH})_2$ // Journal of Loss Prevention in the Process Industries. 2019. No. 57. Pp. 73–80. DOI: 10.1016/j.jlp.2018.08.016. EDN RUQSYR.
2. Hangchen L., Xiaohoi Sh., Xinxin G., Shunchao L., Han Zh., Chendong Zh. et al. High efficiency of the $\text{NH}_4\text{H}_2\text{PO}_4/\text{Mg}(\text{OH})_2$ composite for guaranteeing safety of wood production // Journal Loss Prevention in the Process Industries. 2021. No. 69. P. 104364. DOI: 10.1016/j.jlp.2020.104364. EDN VHGXNS.
3. Wang L., Du Sh., Zhou Zh., Guo Y., Yang Q., Yao S. et al. Enhanced Fire-Extinguishing Performance and Synergy Mechanism of HM/DAP Composite Dry Powder // Materials. 2025. No. 18 (3). P. 533. DOI: 10.3390/ma18030533. EDN YBTTRO.
4. Li X., Zhang M., Zhou Zh., Zhu Yu., Du K., Zhou X. A novel dry powder extinguishant with high cooling performance for suppressing lithium-ion battery fires // Case Studies in Thermal Engineering. 2023. No. 42. P. 102756. DOI: 10.1016/j.csite.2023.102756. EDN PNVOVS.
5. Le G.H., Thanh D.A., My Ph.T.H., Pham T.T.T., Quan T.T.T., Nguen Q.M. et al. Synthesis of magnesium hydroxide powder and dry powders for application in extinguishing petroleum fires // Vietnam Journal of Chemistry. 2024. No. 62 (S1). Pp. 69–35. DOI: 10.1002/vjch.202300279. EDN UHSOQE.
6. Hu W., Yu R., Chang Z., Liu X., Tan Z. The fire extinguishing mechanism of ultrafine composite dry powder agent containing $\text{Mg}(\text{OH})_2$ // International Journal of Quantum Chemistry. 2021. No. 121 (24). P. e26810. DOI: 10.1002/qua.26810. EDN CWRTJT.

7. Wang X. Study on Modification Technology of Superfine Dry Powder Fire Extinguishing Agent // *Journal of Physics: Conference Series*. 2023. No. 2539 (1). P. 012091. DOI: 10.1088/1742-6596/2539/1/012091. EDN OTNIJS.
8. Zhao J., Lu S., Fu Y., Shahid M.U., Zhang H. Application of ultra-fine dry chemicals modified by POTS/OBS for suppressing aviation kerosene pool fire // *Fire Safety Journal*. 2020. No. 118. P. 103148. DOI: 10.1016/j.firesaf.2020.103148. EDN DBZXIS.
9. Zhao J., Fu Y., Yin Z., Xing H., Lu S., Zhang H. Preparation of hydrophobic and oleophobic fine sodium bicarbonate by gel-sol-gel method and enhanced fire extinguishing performance // *Materials & Design*. 2020. No. 186. P. 108331. DOI: 10.1016/j.matdes.2019.108331. EDN DQMVLJ.
10. Liu Yu., Chen R., Zhixuan W., Zhang R., Jing H., Yu D. et al. Effects of thermal aging on the performance of ordinary and novel superhydrophobic and oleophobic ultra-fine dry powder extinguishing agent // *Scientific Reports*. 2025. No. 15. P. 3668. DOI: 10.1038/s41598-025-87718-w
11. Frederic H., Hoorelbeke P., Roosendans D., Dutertreb A., Helschge G. An Experimental Investigation on Fire Extinguishing Powder Efficiency // *Chemical Engineering Transaction*. 2020. No. 82. Pp. 241–246. DOI: 10.3303/CET2082041
12. Ge H., Zhao P., Zhu C., Zhang X., Liu Yu. Analysis of the Influence of Nozzle Structure of Dry Powder Fire Extinguishing System on Supersonic Jet Characteristics // *Machines*. 2024. No. 12 (8). P. 553. DOI: 10.3390/machines12080553. EDN QRQXOW.
13. Ge H., Zhang X., Liu Y. Numerical and Experimental Study on the Jet Behavior of Ultrafine Dry Powder Based on a Supersonic Nozzle // *ACS Omega*. 2024. No. 9 (46). Pp. 46574–46587. DOI: 10.1021/acsomega.4c08542. EDN QWMAWP.
14. Chu S., Chen T., Gan Y., Liu Y., Zheng W., Tang Ya. et al. Numerical Simulation and Experimental Study of Gas–Solid Two-Phase Spraying of Dry Powder Fire-Extinguishing System Based on Fire-Extinguishing Inspection Robot // *Processes*. 2024. No. 12 (6). P. 1239. DOI: 10.3390/pr12061239. EDN WMHVEY.
15. Zhang L., Feng Y., Wu S., Jia H. Numerical Study of the Effect of Primary Nozzle Geometry on Supersonic Gas-Solid Jet of Bypass Injected Dry Powder Fire Extinguishing Device // *Fire*. 2024. No. 7 (2). P. 45. DOI: 10.3390/fire7020045. EDN RSOTGJ.
16. Zhang L., Wu S., Feng Y., Guan H. Numerical Study of a Supersonic Nozzle Gas Jet Laden with a Dry Powder Fire-extinguishing Agent Injected from a Bypass Injector // *Journal of Applied Fluid Mechanics*. 2025. No. 18 (4). Pp. 1098–1114. DOI: 10.47176/jafm.18.4.2840
17. Кицак А.И. Эффективность тушения пожара струйными системами порошкового пожаротушения в условиях нестационарности процессов теплообмена и гетерогенного ингибирования частицами порошка активных центров пламени // *Пожаровзрывобезопасность/Fire and explosion safety*. 2020. № 29 (5). С. 89–99. DOI: 10.22227/PVB.2020.29.05.89-99. EDN TSCLQK.
18. Кицак А.И. Влияние нестационарности процесса теплопередачи на эффективность тушения пожара подкласса А1 модулем порошкового пожаротушения // *Пожарная безопасность*. 2019. № 3 (96). С. 78–84. EDN JK1YQG.
19. Кицак А.И., Палубец С.М., Надточий Д.Н. Анализ процесса гетерогенного ингибирования активных центров пламени струйной горячей системы частицами огнетушащего порошка в нестационарных условиях взаимодействия // *Чрезвычайные ситуации: Предупреждение и ликвидация*. 2021. № 1 (49). С. 127–136. EDN OHDOFP.
20. Кицак А.И. Динамика частиц огнетушащего порошка на пути к очагу пожара при импульсном способе подачи его в зону горения // *ВіТР*. 2018. Vol. 49. Issue 1. Pp. 76–85. DOI: 10.12845/bitp.49.1.2018.72018
21. Абрамович Г.Н. Теория турбулентных струй. Репринтное воспроизведение издания 1960 г. М. : ЭКОЛИТ, 2011. 715 с. URL: https://rusneb.ru/catalog/000199_000009_009477581/?ysclid=mgs5mxo5oc396328601

REFERENCES

1. Du D., Shen X., Feng L., Hua M., Pan X. Efficiency characterization of fire extinguishing compound superfine powder containing Mg(OH)₂. *Journal of Loss Prevention in the Process Industries*. 2019; 57:73-80. DOI: 10.1016/j.jlp.2018.08.016. EDN RUQSYR.
2. Hangchen L., Xiaohoi Sh., Xinxin G., Shunchao L., Han Zh., Chendong Zh. et al. High efficiency of the NH₄H₂PO₄/Mg(OH)₂ composite for guaranteeing safety of wood production. *Journal Loss Prevention in the Process Industries*. 2021; 69:104364. DOI: 10.1016/j.jlp.2020.104364. EDN VHGXNS.
3. Wang L., Du Sh., Zhou Zh., Guo Y., Yang Q., Yao S. et al. Enhanced Fire-Extinguishing Performance and Synergy Mechanism of HM/DAP Composite Dry Powder. *Materials*. 2025; 18(3):533. DOI: 10.3390/ma18030533. EDN YBTTR0.
4. Li X., Zhang M., Zhou Zh., Zhu Yu., Du K., Zhou X. A novel dry powder extinguishant with high cooling performance for suppressing lithium-ion battery fires. *Case Studies in Thermal Engineering*. 2023; 42:102756. DOI: 10.1016/j.csite.2023.102756. EDN PNVQVS.

5. Le G.H., Thanh D.A., My Ph.T.H., Pham T.T.T., Quan T.T.T., Nguen Q.M. et al. Synthesis of magnesium hydroxide powder and dry powders for application in extinguishing petroleum fires. *Vietnam Journal of Chemistry*. 2024; 62(S1):69-35. DOI: 10.1002/vjch.202300279. EDN UHSEOQ.
6. Hu W., Yu R., Chang Z., Liu X., Tan Z. The fire extinguishing mechanism of ultrafine composite dry powder agent containing $Mg(OH)_2$. *International Journal of Quantum Chemistry*. 2021; 121(24):e26810. DOI: 10.1002/qua.26810. EDN CWRTJT.
7. Wang X. Study on Modification Technology of Superfine Dry Powder Fire Extinguishing Agent. *Journal of Physics: Conference Series*. 2023; 2539(1):012091. DOI: 10.1088/1742-6596/2539/1/012091. EDN OTNIJS.
8. Zhao J., Lu S., Fu Y., Shahid M.U., Zhang H. Application of ultra-fine dry chemicals modified by POTS/OBS for suppressing aviation kerosene pool fire. *Fire Safety Journal*. 2020; 118:103148. DOI: 10.1016/j.firesaf.2020.103148. EDN DBZXIS.
9. Zhao J., Fu Y., Yin Z., Xing H., Lu S., Zhang H. Preparation of hydrophobic and oleophobic fine sodium bicarbonate by gel-sol-gel method and enhanced fire extinguishing performance. *Materials & Design*. 2020; 186:108331. DOI: 10.1016/j.matdes.2019.108331. EDN DQMVLJ.
10. Liu Yu., Chen R., Zhixuan W., Zhang R., Jing H., Yu D. et al. Effects of thermal aging on the performance of ordinary and novel superhydrophobic and oleophobic ultra-fine dry powder extinguishing agent. *Scientific Reports*. 2025; 15:3668. DOI: 10.1038/s41598-025-87718-w
11. Frederic H., Hoorelbeke P., Roosendans D., Dutertreb A., Hellschge G. An Experimental Investigation on Fire Extinguishing Powder Efficiency. *Chemical Engineering Transaction*. 2020; 82:241-246. DOI: 10.3303/CET2082041
12. Ge H., Zhao P., Zhu C., Zhang X., Liu Yu. Analysis of the Influence of Nozzle Structure of Dry Powder Fire Extinguishing System on Supersonic Jet Characteristics. *Machines*. 2024; 12(8):553. DOI: 10.3390/machines12080553. EDN QRQXOW.
13. Ge H., Zhang X., Liu Y. Numerical and Experimental Study on the Jet Behavior of Ultrafine Dry Powder Based on a Supersonic Nozzle. *ACS Omega*. 2024; 9(46):46574-46587. DOI: 10.1021/acsomega.4c08542. EDN QWMAWP.
14. Chu S., Chen T., Gan Y., Liu Y., Zheng W., Tang Ya. et al. Numerical Simulation and Experimental Study of Gas-Solid Two-Phase Spraying of Dry Powder Fire-Extinguishing System Based on Fire-Extinguishing Inspection Robot. *Processes*. 2024; 12(6):1239. DOI: 10.3390/pr12061239. EDN WMHVEY.
15. Zhang L., Feng Y., Wu S., Jia H. Numerical Study of the Effect of Primary Nozzle Geometry on Supersonic Gas-Solid Jet of Bypass Injected Dry Powder Fire Extinguishing Device. *Fire*. 2024; 7(2):45. DOI: 10.3390/fire7020045. EDN RSOTGJ.
16. Zhang L., Wu S., Feng Y., Guan H. Numerical Study of a Supersonic Nozzle Gas Jet Laden with a Dry Powder Fire-extinguishing Agent Injected from a Bypass Injector. *Journal of Applied Fluid Mechanics*. 2025; 18(4):1098-1114. DOI: 10.47176/jafm.18.4.2840
17. Kitsak A.I. Efficiency of fire suppression systems using dry powder sprays to extinguish fires amid non-steady heat exchange processes and heterogeneous inhibition of active centers by powder particles. *Pozharovzryvbezopasnost' / Fire and Explosion Safety*. 2020; 29(5):89-99. DOI: 10.22227/PVB.2020.29.05.89-99. EDN TSCLQK. (rus).
18. Kitsak A.I. The influence of nonstationarity of the process of heat transfer on the efficiency of extinguishing subclass A1 fires by powder fire extinguishing module. *Fire safety*. 2019; 3(96):78-84. EDN JKIQG.
19. Kitsak A.I., Palubets S.M., Nadochiy D.N. Analysis of the process of heterogeneous inhibition of the active flame centers of a jet burning system by fire extinguishing powder particles under nonstationary conditions of interaction. *Emergency situations: Prevention and elimination*. 2021; 1(49):127-136. EDN OHDOPF. (rus).
20. Kitsak A.I. The dynamics of dry chemical powder particles towards the fire source during their pulse feeding into the combustion zone. *BiTP*. 2018; 49(1):76-85. DOI: 10.12845/bitp.49.1.2018.72018 (rus).
21. Abramovich G.N. *Theory of turbulent jets. Reprint of the 1960 edition*. Moscow, EKOLIT, 2011; 715. URL: https://rusneb.ru/catalog/000199_000009_009477581/?ysclid=mgs5mxo5oc396328601 (rus).

Поступила 28.09.2025, после доработки 07.10.2025;

принята к публикации 10.10.2025

Received September 28, 2025; Received in revised form October 07, 2025;

Accepted October 10, 2025

Информация об авторе

САЕНКОВА Александра Борисовна, главный конструктор, ООО «Каланча Инжиниринг», Россия, 141300, г. Сергиев Посад, Скобяное ш., 3; ORCID: 0000-0001-6502-6904; РИНЦ ID: 1108799; ResearcherID: IUP-7179-2023; e-mail: a.saenkova@gmail.com

Information about the author

Alexandra B. SAENKOVA, Chief Designer, Kalancha Engineering LLC, Skobyano highway, 3, Sergiev Posad, 143903, Russian Federation; ORCID: 0000-0001-6502-6904; ID RSCI: 1108799; ResearcherID: IUP-7179-2023; e-mail: a.saenkova@gmail.com

ПОЖАРОВЗРЫВОБЕЗОПАСНОСТЬ/FIRE AND EXPLOSION SAFETY. 2025. Т. 34. № 5. С. 71–78
POZHAROVZRYVOBEZOPASNOST/FIRE AND EXPLOSION SAFETY. 2025; 34(5):71-78

ОБЗОРНАЯ СТАТЬЯ/REVIEW ARTICLE

УДК 514.841.12

<https://doi.org/10.22227/0869-7493.2025.34.05.71-78>

Пожарная безопасность применения аммиака как безуглеродного топлива для автомобилей и судов

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 проведения исследований в области пожарной безопасности применения аммиака в качестве моторного топлива. Актуальность статьи обусловлена необходимостью анализа мирового опыта использования аммиака для автомобилей и судов. Целью работы является аналитический обзор исследований в области пожарной безопасности объектов с использованием аммиака как моторного топлива. При этом основной задачей является выявление пробелов в результатах уже проведенных исследований и разработка предложений по дальнейшим работам.

Анализ исследований в области обеспечения пожарной безопасности применения аммиака в качестве топлива. Проанализированы публикации в международных журналах, посвященные решению проблемы пожарной безопасности использования аммиака для автомобилей и судов. Исследования в этом направлении ведутся во многих странах мира, хотя пока нет широкой практической реализации их результатов. До сих пор нет общепринятых международных стандартов, регламентирующих безопасность применения аммиака в качестве автомобильного и судового топлива, несмотря на наличие нормативов для промышленного использования этого газа. Отмечены нерешенные проблемы в рассматриваемой области (безопасные расстояния, системы пожарной автоматики, конструктивные решения и т.п.).

Выводы. Аммиак является перспективным видом моторного топлива для автомобилей и судов. Однако результаты работ, опубликованных в научной печати, свидетельствуют о недостаточной для широкого практического использования проработанности вопросов пожарной безопасности, в связи с чем представляется необходимым проведение дополнительных исследований.

Ключевые слова: автомобильный транспорт; водный транспорт; заправочная станция; требования пожарной безопасности; нормативные документы

Для цитирования: Шебеко Ю.Н. Пожарная безопасность применения аммиака как безуглеродного топлива для автомобилей и судов // Пожаровзрывобезопасность/Fire and Explosion Safety. 2025. Т. 34. № 5. С. 71–78. DOI: 10.22227/0869-7493.2025.34.05.71-78

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

Fire safety of ammonia as a carbon-free fuel for cars and ships

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 paper substantiates the necessity of research in the field of fire safety of ammonia use as motor fuel. The relevance of the paper is due to the need to analyze the world experience of using ammonia for cars and ships. The purpose of the work is an analytical review of research in the field of fire safety of objects using ammonia as a motor fuel. At the same time, the main task is to identify gaps in the results of already conducted research and to develop proposals for further work.

Analysis of investigations in the area of the fire safety of an application of ammonia for cars and ships. Papers in international journals devoted to solving the problem of fire safety of ammonia use for cars and ships were analyzed. Research in this direction is carried out in many countries of the world, although there is still no wide practical implementation of their results. There are still no generally accepted international standards regulating the safety of ammonia use as motor vehicle and marine fuel, despite the existence of regulations for the industrial use of this gas. Unresolved problems in this area (safety distances, fire automation systems, design solutions, etc.) are noted.

Conclusions. Ammonia is a promising type of motor fuel for cars and ships. However, the results of works published in scientific press show that the elaboration of fire safety issues is insufficient for wide practical use, therefore it seems necessary to carry out additional research.

Keywords: automobile transport; water transport; refueling station; fire safety requirements; normative documents

For citation: Shebeko Yu.N. Fire safety of ammonia as a carbon-free fuel for cars and ships. *Pozharovzryvobezopasnost, Fire and Explosion Safety*. 2025; 34(5):71-78. DOI: 10.22227/0869-7493.2025.34.05.71-78 (rus).

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

Введение

В настоящее время во многих странах мира проводятся исследования в области предотвращения разрушения озонового слоя Земли, происходящего за счет выделения в атмосферу опасных газов различной природы в результате работы транспорта и промышленной деятельности. Особую опасность представляет применение ископаемого топлива, приводящее также в силу образования при горении диоксида углерода к потеплению климата. Одним из путей решения этой проблемы является переход к водородной энергетике. Возникающие при этом вопросы обеспечения пожарной безопасности и пути их решения рассмотрены в обзорах [1–3]. Однако водород как топливо имеет и недостатки, связанные с его хранением и транспортировкой в сжатом или сжиженном виде.

Будущие энергетические системы, помимо удовлетворения экологических требований, должны обладать эффективными и безопасными методами хранения и транспортировки энергии. На сегодняшний день существует ряд механических, электрических, тепловых и химических способов для осуществления технологических процессов хранения и транспортировки. Среди этих способов перспективным является применение аммиака, который может быть получен как из ископаемого топлива, так и с помощью возобновляемых источников энергии (ветровых и солнечных). Настоящая работа посвящена анализу публикаций, посвященных проблеме обеспечения пожарной безопасности применения аммиака как безуглеродного топлива для автомобилей и судов.

Анализ исследований в области обеспечения пожарной безопасности применения аммиака в качестве топлива

Общие вопросы применения аммиака как источника энергии рассмотрены в работе [4]. Преимущества аммиака по сравнению с другими видами топлива заключаются в следующем.

1. Аммиак NH_3 не содержит атомов углерода в молекуле, т.е. продукты его полного сгорания не влияют на озоновый слой Земли. Этот газ может быть синтезирован в безуглеродных процессах

с использованием возобновляемых источников энергии (ВИЭ).

2. Достаточно высокая плотность запасенной энергии (22,5 МДж/кг), сравнимая со случаем ископаемого топлива (уголь — 20 МДж/кг, природный газ — 55 МДж/кг).

3. Легко сжижается при комнатной температуре и давлении 0,8 МПа.

4. Существуют развитые технологии и инфраструктура для хранения и транспортировки NH_3 (трубопроводы, железнодорожный, автомобильный и водный транспорт).

Работы по использованию аммиака в качестве топлива ведутся в различных странах мира. В Японии создан консорциум из 22 организаций под названием “Green ammonia” («Зеленый аммиак»), рассматривающий NH_3 как составную часть водородной энергетике. В США развивается программа “Renewable Energy to Fuels through Utilization of Energy-Dense Liquids” («Возобновляемая энергия, получаемая от жидкостей с высокой плотностью энергии»), направленная на поиск способов превращения электрической энергии от ВИЭ в энергию безуглеродных жидких продуктов с дальнейшим ее превращением обратно в электрическую энергию. Работы по аммиаку как перспективному носителю энергии ведутся в Великобритании и направлены на использование ветровой энергии для получения NH_3 как продукта для хранения энергии с дальнейшим ее использованием для двигателей внутреннего сгорания (ДВС). Отмечена особая актуальность применения аммиака для островных территорий с дефицитом энергии. В Австралии планируется строительство завода для производства аммиака на основе получения водорода с помощью ВИЭ с дальнейшим синтезом NH_3 . В случае успеха этой программы окажется возможным отказаться от природного газа при производстве аммиака. Международное энергетическое агентство (International Energy Agency — IAE) изучает возможность синтеза аммиака с использованием водорода, полученного от ВИЭ, который гораздо дешевле хранить и транспортировать по сравнению с H_2 . Имеются потенциальные барьеры на пути применения аммиака, связанные с его токсичностью и необходимостью

предотвращения образования окислов азота при его горении.

Преимущества использования аммиака состоят в следующем.

1. Уменьшение выбросов диоксида углерода.

2. Снижение пожарной опасности в силу более низкой пожарной опасности аммиака.

3. Наличие развитой инфраструктуры хранения и транспортировки по сравнению с использованием водорода. Имеется опыт применения аммиака в качестве моторного топлива во время 2-й мировой войны — в 1942 г. в Бельгии из-за нехватки бензина около 100 автобусов работали на аммиаке.

Аммиак как моторное топливо может использоваться в двигателях внутреннего сгорания или в автомобилях с топливными ячейками, в которых в результате химических превращений на катализаторе генерируется химическая энергия. Работы [5–7] посвящены рассмотрению данного способа использования NH_3 . В случае применения аммиака в ДВС к нему следует добавлять более активные горючие для компенсации его низкой нормальной скорости горения (например, водород). При этом водород может быть получен непосредственно на борту транспортного средства за счет частичного каталитического разложения аммиака. Найдено, что добавка 10 % H_2 дает оптимальную эффективность двигателя [8].

Одной из целей «зеленой» энергетики является декарбонизация судоходства путем использования безуглеродного корабельного топлива, полученного с применением возобновляемых источников энергии [9–12]. В настоящее время пока не существует эксплуатируемых судов на аммиачном топливе, но многие судоходные компании на разных стадиях реализуют проекты по созданию таких судов и соответствующей портовой инфраструктуры. Так, например, японская компания Mitsubishi Heavy Industries завершила этап концептуального проектирования. Китайская компания China State Shipbuilding Corporation получила одобрение классификационного органа DNV на строительство до 7000 судов, работающих на аммиаке. Корейская компания Samsung Heavy Industries строит 2 больших судна на аммиачном топливе. Отсутствуют общепринятые нормативные документы по применению аммиака в качестве корабельного топлива, однако имеются документы классификационных обществ (ABS, 2020. Guidance Notes on Risk Assessment Applications for the Marine and Offshore Industries (USA); DNV GL, 2020. Ammonia as a Marine Fuel (Norway); KR, 2021. Guidelines for Ships Using Ammonia as a Fuel (Korea); RINA, 2021. Amendments to the “Rules for the Classification of Ships and Relevant New Additional Class Notations” (Italy)).

Дана характеристика аммиака по сравнению со сжиженными углеводородными газами (СУГ), близкими к NH_3 по физическим свойствам. Аммиак имеет относительно узкую концентрационную область распространения пламени с высоким нижним концентрационным пределом распространения пламени (15 % (об.)), высокую минимальную энергию зажигания (8,0 мДж, для сравнения — в случае СУГ 0,28 мДж), низкую нормальную скорость горения (0,07 м/с, для сравнения в случае СУГ — 0,43 м/с). Пожарная опасность аммиака существенно ниже по сравнению с другими альтернативными топливами. Однако аммиак имеет высокую токсичность паров, их максимально допустимая концентрация в воздухе 30 ppm. Аммиак коррозионно активен, особенно по отношению к меди, латуни и цинку.

Аварии с аммиаком на химических предприятиях являются нередким событием. Так, например, в Канаде в период с 2007 по 2017 г. зафиксировано 59 утечек NH_3 , 14 из которых привели к поражению людей. В США с 1984 г. имели место 306 случаев, из них 58 привели к человеческим жертвам. В частности, в штате Техас произошел инцидент с гибелью 15 человек в результате пожара на заводе по производству удобрений. В среднем каждую неделю было не менее 1 инцидента. В период с 1978 по 2021 г. было 12 аварий на судах, перевозящих аммиак. Одна из них в 1983 г. унесла 46 жизней при взрыве аммиачно-воздушной смеси в машинном отделении судна.

Изложены некоторые противопожарные мероприятия для аммиачных судовых систем. Минимальная интенсивность водяного орошения при пожаре составляет 10 л/(мин·м²) для горизонтальных и 4 л/(мин·м²) для вертикальных конструкций. Судно должно быть оснащено автоматической системой порошкового пожаротушения при расходе порошка 3,5 кг/с при длительности подачи не менее 45 с. В зоне заправки судна топливом следует предусмотреть наличие порошковых огнетушителей с массой порошка 5 кг, а также аварийные водяные завесы. Вентиляционные системы должны иметь производительность не менее 30 объемов в час. Бункеровочные станции должны располагаться на открытой палубе для обеспечения условий проветриваемости. Заправочные рукава должны быть рассчитаны на давление, превышающее рабочее давление при бункеровке не менее чем в 5 раз. Заправочная арматура должна располагаться на расстоянии не менее 10 м от воздухозаборов. Должно быть предусмотрено автоматическое перекрытие аммиачных магистралей в случае аварии за время не более 5 с при срабатывании системы обнаружения утечек газа.

Отмечено, что отсутствует официально одобренный международный нормативный документ, регламентирующий безопасность применения аммиака

в качестве судового топлива. Упомянутые выше документы различных обществ не всегда согласуются один с другим. Например, нормативные безопасные расстояния от предохранительных клапанов судовых хранилищ NH_3 находятся в диапазоне 10–25 м. Сформулированы основные направления дальнейших работ, среди которых одним из основных является создание бункеровочной инфраструктуры.

В работе [11] аммиак рассматривается как судовое топливо будущего. Проанализировано его использование для производства электроэнергии с помощью топливных ячеек (см. также [5–7, 13]). Отмечено, что около половины возобновляемых источников энергии локализовано в Азии и лишь 25 % в Европе. Около 52 % приходится на ветровые и солнечные системы, остальное — на гидростанции, приливные и геотермические источники. Годовой прирост ветровых и солнечных источников составляет 10 и 20 % соответственно.

Водород имеет высокую стоимость, кроме того, существуют проблемы его хранения и транспортировки. Потому неясно, станет ли он основным носителем «зеленой» энергии в транспортном секторе. Альтернативой является аммиак, который может быть использован в том числе и в качестве судового топлива. Компания DNV предполагает, что к 2050 г. по крайней мере 15 % морских перевозок на длинные расстояния будут осуществляться за счет аммиака или водорода¹. Технологии производства, хранения и транспортировки NH_3 хорошо разработаны. Хранения жидкого аммиака в 16 раз дешевле хранения жидкого водорода.

Для производства аммиака чаще всего используется процесс синтеза из водорода и азота на катализаторах при температуре 400–600 °С и давлении 20–40 МПа. Так называемый «коричневый» NH_3 получают с помощью энергии ископаемого топлива, «голубой» NH_3 — с помощью такого же процесса, но с утилизацией образующегося диоксида углерода, «зеленый» NH_3 — с использованием энергии от возобновляемых источников. В последние годы «зеленый» аммиак рассматривается для применения на транспорте в Норвегии, Австралии, Китае, Германии, Израиле и в Японии. При этом должны реализоваться следующие производственные цепочки: получение энергии от ВИЭ, электролиз воды с получением водорода, синтез аммиака, сжижение аммиака с дальнейшим хранением и транспортировкой, а также в двигателях внутреннего сгорания или топливных ячейках. Отмечено, что мощности 140 ГВт от ветровых и сол-

нечных источников достаточно для получения требуемого судового топлива. С экономической точки зрения применение жидкого аммиака в качестве топлива существенно дешевле по сравнению с жидким водородом, однако несколько дороже по сравнению с углеводородсодержащими продуктами (СПГ, диметиловый эфир, метанол), для которых в то же время требуется улавливание образующегося диоксида углерода.

Твердотопливные ячейки, служащие для генерации электроэнергии с использованием аммиака, имеют хорошую перспективу практического применения [14]. Эффективность превращения химической энергии аммиака в электрическую составляет около 50 %, что выше эффективности дизельных двигателей. Проведено сравнение жидкого аммиака с СПГ в качестве моторного топлива, результаты которого представлены ниже:

- для жидкого аммиака необходим удельный объем хранения, в 1,5 раза превышающий аналогичную величину для СПГ;
- аммиак менее пожароопасен по сравнению с СПГ;
- требуются изменения в нормативном регулировании с учетом использования аммиака в качестве топлива.

Аммиак может использоваться в дизельных двигателях, но при этом возникает проблема утилизации окислов азота в продуктах сгорания. Поскольку физические свойства жидкого аммиака близки к свойствам СУГ, может быть использован опыт хранения и транспортировки этого продукта.

Особенности технологий производства, хранения и транспортировки аммиака рассмотрены в работе [15]. Отмечена перспективность хранения и транспортировки «чистой» энергии с помощью веществ, молекулы которых содержат большое количество атомов H (водород, аммиак, метанол, метилциклогексан). Применение аммиака в этом плане имеет экономические преимущества в силу следующих причин:

- молекула аммиака содержит достаточно относительно большое количество атомов водорода;
- аммиак легко разлагается на катализаторе с образованием водорода, который может быть использован в транспортных и энергетических установках;
- наличие развитой инфраструктуры производства, хранения и транспортировки аммиака, а также наличие соответствующей нормативной базы по упомянутым вопросам.

В силу этого аммиак все более часто рассматривается как ключевой носитель энергии в энергетических системах будущего. Аммиак, как правило, производится синтезом из H_2 и N_2 , при этом водород может быть получен из ископаемого топлива

¹ DNV. Energy transition outlook-2021 executive summary. A global and regional forecast to 2050. URL: <https://www.hotstart.com/assets/Blog-Images/Article07-Energy-Transition-Terry-Judge-Message/DNV-Energy-Transition-2021.pdf>

с утилизацией образующегося диоксида углерода («голубой» водород) или путем электролиза воды с применением возобновляемых источников энергии («зеленый» водород). В работе [15] излагаются предложения по необходимым исследованиям по использованию NH_3 как носителя энергии, фокусируясь на технологиях синтеза аммиака, его разложения для получения водорода и прямого использования для получения энергии.

Аммиак, помимо его использования в качестве агента для хранения и транспортировки энергии, может быть непосредственно применен для получения энергии в топливных ячейках, двигателях внутреннего сгорания и в газовых турбинах. При этом следует учитывать такие его недостатки, как высокую энергию зажигания, низкую плотность энергии по сравнению с углеводородами, низкую нормальную скорость горения и относительно узкую концентрационную область распространения пламени. В силу этого целесообразно использовать смеси NH_3 с более активными горючими (например, с водородом). Существенным недостатком аммиака является высокая эмиссия окислов азота NO_x при горении, который может быть устранен проведением горения при пониженных концентрациях кислорода. Несгоревший NH_3 и NO_x могут быть удалены из продуктов сгорания с помощью катализаторов, установленных на выхлопной трубе.

Сформулированы направления необходимых исследований, направленных на расширенное использование аммиака в качестве топлива.

1. Производство NH_3 с малым выделением углеродсодержащих веществ, для чего необходимо совершенствование способов удаления диоксида углерода из продуктов реакции или разработка процессов получения NH_3 с помощью ВИЭ.

2. Разработка эффективных крупнотоннажных методов получения водорода из аммиака с очисткой образующегося продукта.

3. Разработка эффективных и надежных методов генерации энергии с помощью аммиака.

4. Техничко-экономический анализ применения аммиака в качестве топлива.

5. Общественное признание возможности использования аммиака в качестве топлива с учетом его токсичности.

В работе [16] рассмотрены вопросы хранения и транспортировки водорода в связанном виде с помощью аммиака, что связано с определенными сложностями хранения и транспортировки H_2 в чистом виде. Проводится сравнение физико-химических свойств газообразного (GH_2) водорода, жидкого (LH_2) водорода и аммиака, влияющих на применение этих продуктов. В рассматриваемом случае аммиак получают синтезом из азота и водорода,

полученного электролизом воды с использованием электроэнергии от гидроэлектростанции, расположенной на границе Бразилии и Парагвая и имеющей мощность 14 ГВт. Из этой мощности 15 % потребляется Бразилией и 85 % Парагваем, для которого эта мощность является избыточной. Этот избыток предложено использовать для получения аммиака.

Вопросы транспортировки «зеленой» энергии между странами с использованием аммиака рассмотрены в работе [17] на примере Норвегии, стран Евросоюза и Японии. Норвегия имеет большой потенциал стать значительным производителем и поставщиком «зеленой» энергии, полученной от ВИЭ, но она расположена относительно далеко от крупных рынков сбыта. В случае использования водорода как носителя энергии требуется его морская транспортировка в жидком виде или с помощью жидких органических носителей водорода. В данной работе проведен сравнительный анализ маршрутов доставки водорода из Норвегии на европейские рынки и в Японию. Анализируются такие носители энергии, как жидкий водород и аммиак. В качестве водородного носителя энергии рассмотрен «голубой» водород, произведенный с помощью реформинга природного газа с улавливанием и хранением образующегося диоксида углерода. Произведенный водород может транспортироваться в страны Европы или в Японию в сжиженном или связанном (в виде NH_3). Найдено, что при транспортировке в Японию через Суэцкий канал использование жидкого водорода энергетически выгоднее, чем аммиака с учетом затрат энергии на его разложение для получения водорода. При этом учитывается энергия, затрачиваемая на транспортировку.

В работе [18] дан обзор энергетических проектов, основанных на применении аммиака. Рассмотрены энергетические системы с использованием ветровой и солнечной энергии, размещенные на морских островах с повышенной ветровой и солнечной активностью. Проанализированы различные методы получения NH_3 , при этом удельные энергетические затраты составляют 6,9–11,7 кВт час на 1 кг аммиака в зависимости от метода его получения. Отмечено, что имеются первые экспериментальные предприятия по производству аммиака с помощью ветровых источников энергии в таких странах, как Япония, Великобритания, США, Аргентина, Китай, Швейцария. Использование NH_3 в целях производства энергии происходит либо с помощью сжигания аммиака, либо с помощью топливных ячеек.

Как следует из вышеизложенного, аммиак представляет интерес с точки зрения хранения и транспортировки энергии. Для автомобилей на водородном топливе представляет интерес разработка эффективных технологий получения H_2 из NH_3 с дальнейшей

его очисткой. Изучению этого вопроса посвящена работа [19], в которой дан обзор исследований способов каталитического разложения аммиака для получения водорода. Отмечена высокая эффективность катализатора на основе рутения при температурах около 500 °С.

Выводы

Проанализированы различные аспекты применения аммиака в качестве моторного топлива для различных видов транспорта (автомобильный, морской, речной). Работы в указанном направлении проводятся в различных странах мира, однако до сих пор нет международного нормативного документа, регламентирующего безопасность применения этого вида топлива. Имеются нормативные документы раз-

личных обществ, регулирующие хранение и транспортировку NH_3 , которые не всегда согласуются друг с другом. Регламентированный срок эксплуатации хранилища ограничен величиной 20–25 лет. Безопасные расстояния от мест сброса газа составляют 10–25 м. Спринклерные системы предлагается запускать не от датчиков пламени, а от газосигнализаторов. Системы вентиляции, предназначенные для удаления аварийных утечек аммиака, должны быть отделены от прочих вентиляционных систем. Результаты анализа опубликованных работ свидетельствуют о недостаточной проработанности вопросов пожаровзрывобезопасности. На основе проведенного анализа сформулированы направления дальнейших исследований применения аммиака в качестве моторного топлива для автомобильного и морского транспорта.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. *Шебеко Ю.Н.* Пожарная безопасность заправочной инфраструктуры транспорта на водородном топливе // Пожаровзрывобезопасность/Fire and Explosion Safety. 2024. № 33 (6). С. 56–66. DOI: 10.22227/0869-7493.2024.33.06.56-66. EDN BWDUBB.
2. *Шебеко Ю.Н.* Пожарная безопасность хранения и транспортировки водорода // Пожарная безопасность. 2023. № 1 (100). С. 17–26. DOI: 10.37657/vniipo.pb.2023.110.1.001. EDN JBMKKQ.
3. *Гордиенко Д.М., Шебеко Ю.Н.* Пожаровзрывобезопасность объектов водородной энергетики // Безопасность труда в промышленности. 2022. № 2. С. 7–12. DOI: 10.24000/0409-2961-2022-2-7-12. EDN FYZNQV.
4. *Valera-Medina A., Xiao H., Bowen P.J., Owen-Jones M., David W.I.F.* Ammonia for power // Progress in Energy and Combustion Science. 2018. No. 69. Pp. 63–102. DOI: 10/1016/j.pecs.2018.07.001. EDN VJIYIV.
5. *Farhad S., Hamdullahpur F.* Conceptual design of a novel ammonia-fueled portable solid oxide fuel cell system // Journal of Power Sources. 2010. No. 195 (10). Pp. 3084–3090. DOI: 10.1016/j.jpowsour.2009.11.115. EDN NWUPYF.
6. *Fournier G.G.M., Cumming I.W., Hellgardt K.* High performance direct ammonia solid oxide fuel cell // Journal of Power Sources. 2006. No. 162 (1). Pp. 198–206. DOI: 10.1016/j.jpowsour.2006.06.047. EDN KKRTNF.
7. *Ma Q., Peng R., Lin Y., Gao J., Meng G.* A high-performance ammonia-fueled solid oxide fuel cell // Journal of Power Sources. 2006. No. 161 (1). Pp. 95–98. DOI: 10.1016/j.jpowsour.2006.04.099. EDN KKRVSU.
8. *Comotti M., Frigo S.* Hydrogen generation system for ammonia-hydrogen fueled internal combustion engines // International Journal of Hydrogen Energy. 2015. No. 40 (33). Pp. 10673–10886. DOI: 10.1016/j.ijhydene.2015.06.080
9. *Jang H., Mujeeb-Ahmed M.P., Wang H., Park C., Hwang I., Jeong B. et al.* Regulatory gap analysis for risk assessment of ammonia-fueled ships // Ocean Engineering. 2023. No. 287 (2). P. 115751. DOI: 10.1016/j.oceaneng.2023.115751
10. *Egerer J., Grimm V., Niazmand K., Runge Ph.* The economics of global green ammonia trade — “Shipping Australian wine and sunshine to Germany” // Applied Energy. 2023. No. 334. P. 120662. DOI: 10.1016/j.apenergy.2023.120662. EDN KVLQYV.
11. *Majaj K., Kupecki J., Malecha Z., Morawski A.W., Skrzypkiewicz M., Stanlic M. et al.* Ammonia as potential marine fuel : a review // Energy Strategy Reviews. 2022. No. 44. P. 100926. DOI: 10.1016/j.esr.2022.100926. EDN YVIVAU.
12. *Hansson J., Mansson S., Brynolf S., Grahn M.* Alternative marine fuels: prospects based on multi-criteria decision analysis involving Swedish stakeholders // Biomass and Bioenergy. 2019. No. 126 (33). Pp. 159–173. DOI: 10.1016/biomdicoe.2019.05.008
13. *Afif A., Radenahmad N., Cheok Q., Azad A.K., Shams S., Kim J.H.* Ammonia-fueled fuel cells : a comprehensive review // Renewable and Sustainable Energy Reviews. 2016. No. 60. Pp. 822–835. DOI: 10.1016/j.rser.2016.01.120. EDN WUWWAD.

14. Rathore S.S., Fini D., Kulkarni A.P., Giddey S., Bismas S. Direct ammonia solid-oxide fuel cells : a review of progress and prospects // *International Journal of Hydrogen Energy*. 2021. No. 46 (71). Pp. 35365–35384. DOI: 10.1016.2021.08.092. EDN CIVXOK.
15. Morlanes N., Katikaneni S.P., Paglieri S.N., Harale A., Solami B., Sarathy S.M. et al. A technological roadmap to the ammonia energy economy: Current state and missing technologies // *Chemical Engineering Journal*. 2020. No. 408. P. 127310. DOI: 10.1016/cej.2020.127310. EDN QBPFXP.
16. Rivarolo M., Riveros-Godoy G., Magistri L., Massardo A.F. Clean hydrogen and ammonia synthesis in Paraguay from the Itaipu 14 GW hydroelectric plant // *Chemical Engineering*. 2019. No. 3 (4). P. 87. DOI: 10.3390/chemengineering3040087
17. Ishimoto Y., Voldsund M., Neksa P., Roussanaly S., Berstad D., Gardarsdottir S.O. Large-scale production and transport of hydrogen from Norway to Europe and Japan: Value chain analysis and comparison of liquid hydrogen and ammonia as energy carriers // *International Journal of Hydrogen Energy*. 2020. No. 45 (58). Pp. 32865–32883. DOI: 10.1016/j.ijhydene.2020.09.017. EDN NMWFJF.
18. Rouwenhorst K.H.R., Van den Ham A.G.J., Mul G., Kersten S.R.A. Islanded ammonia power systems: Technology review & conceptual process design // *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. 2019. No. 114. P. 109339. DOI: 10.1016/j.rser.2019.109339
19. Lamb K.E., Dolan M.D., Kennedy D.F. Ammonia for hydrogen storage: A review of catalytic ammonia decomposition and hydrogen separation and purification // *International Journal of Hydrogen Energy*. 2019. No. 44 (7). Pp. 3580–3593. DOI: 10.1016/j.ijhydene.2018.12.024. EDN WXXWOF.

REFERENCES

1. Shebeko Yu.N. Fire safety of hydrogen fuel transport refueling infrastructure. *Pozharovzryvobezopasnost/Fire and Explosion Safety*. 2024; 34(6):56-66. DOI: 10.22227/0869-7493.2024.33.06.56-66. EDN BWDUBB. (rus).
2. Shebeko Yu.N. Fire safety of hydrogen storage and transportation. *Fire Safety*. 2023; 1(100):17-26. DOI: 10.37657/vniipo.pb.2023.110.1.001. EDN JBMKKQ. (rus).
3. Gordienko D.M., Shebeko Yu.N. Fire and explosion safety of hydrogen energetics facilities. *Occupational Safety in Industry*. 2022; 2:7-12. DOI: 10.24000/0409-2961-2022-2-7-12. EDN FYZNQV. (rus).
4. Valera-Medina A., Xiao H., Owen-Jones M., David W.I.F., Bowen P.J. Ammonia for power. *Progress in Energy and Combustion Science*. 2018; 69:63-102. DOI: 10/1016/j.peccs.2018.07.001. EDN VJIYIV.
5. Farhad S., Hamdullahpur F. Conceptual design of a novel ammonia-fueled portable solid oxide fuel cell system. *Journal of Power Sources*. 2010; 195(10):3084-3090. DOI: 10.1016/j.jpowsour.2009.11.115. EDN NWUPYF.
6. Fournier G.G.M., Cumming I.W., Hellgardt K. High performance direct ammonia solid oxide fuel cell. *Journal of Power Sources*. 2006; 162(1):198-206. DOI: 10.1016/j.jpowsour.2006.06.047. EDN KKRNTF.
7. Ma Q., Peng R., Lin Y., Gao J., Meng G. A high-performance ammonia-fueled solid oxide fuel cell. *Journal of Power Sources*. 2006; 161(1):95-98. DOI: 10.1016/j.jpowsour.2006.04.099. EDN KKRVSJ.
8. Comotti M., Frigo S. Hydrogen generation system for ammonia-hydrogen fueled internal combustion engines. *International Journal of Hydrogen Energy*. 2015; 40(33):10673-10886. DOI: 10.1016/j.ijhydene.2015.06.080.
9. Jang H., Mujeeb-Ahmed M.P., Wang H., Park C., Hwang I., Jeong B. et al. Regulatory gap analysis for risk assessment of ammonia-fueled ships. *Ocean Engineering*. 2023; 287(2):115751. DOI: 10.1016/j.oceaneng.2023.115751
10. Egerer J., Grimm V., Niazmand K., Runge P. The economics of global green ammonia trade — “Shipping Australian wine and sunshine to Germany”. *Applied Energy*. 2023; 334:120662. DOI: 10.1016/j.aplenergy.2023.120662. EDN KVLQV.
11. Majaj K., Kupecki J., Malecha Z., Morawski A.W., Skrzypekiewicz M., Stanclik M. et al. Ammonia as potential marine fuel : a review. *Energy Strategy Reviews*. 2022; 44:100926. DOI: 10.1016/j.esr.2022.100926. EDN YVIVAU.
12. Hansson J., Mansson S., Brynolf S., Grahn M. Alternative marine fuels: prospects based on multi-criteria decision analysis involving Swedish stakeholders. *Biomass Bioenergy*. 2019; 126(33):159-173. DOI: 10.1016/biomdi-oe.2019.05.008
13. Afif A., Radenahmad N., Cheok Q., Azad A.K., Shams S., Kim J.H., Azad A.K. Ammonia-fed fuel cells : a comprehensive review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. 2016; 60:822-835. DOI: 10.1016/j.rser.2016.01.120. EDN WUWAD.
14. Rathore S.S., Fini D., Kulkarni A.P., Giddey S., Bismas S. Direct ammonia solid-oxide fuel cells : a review of progress and prospects. *International Journal of Hydrogen Energy*. 2021; 46(71):35365-35384. DOI: 10.1016.2021.08.092. EDN CIVXOK.
15. Morlanes N., Katikaneni S.P., Paglieri S.N., Harale A., Solami B., Sarathy S.M. et al. A technological roadmap to the ammonia energy economy: Current state and missing technologies. *Chemical Engineering Journal*. 2020; 408:127310. DOI: 10.1016/cej.2020.127310. EDN QBPFXP.

16. Rivarolo M., Riveros-Godoy G., Magistri L., Massardo A.F. Clean hydrogen and ammonia synthesis in Paraguay from the Itaipu 14 GW hydroelectric plant. *Chemical Engineering*. 2019; 3(4):87. DOI: 10.3390/chemengineering3040087
17. Ishimoto Yu., Voldsund M., Neksa P., Roussanaly S., Berstad D., Gardarsdottir S.O. Large-scale production and transport of hydrogen from Norway to Europe and Japan: Value chain analysis and comparison of liquid hydrogen and ammonia as energy carriers. *International Journal of Hydrogen Energy*. 2020; 45(58):32865-32883. DOI: 10.1016/j.ijhydene.2020.09.017. EDN NMWFJF.
18. Rouwenhorst K.H.R., Van den Ham A.G.J., Mul G., Kersten S.R.A. Islanded ammonia power systems: Technology review & conceptual process design. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. 2019; 114:109339. DOI: 10.1016/j.rser.2019.109339
19. Lamb K.E., Dolan M.D., Kennedy D.F. Ammonia for hydrogen storage: A review of catalytic ammonia decomposition and hydrogen separation and purification. *International Journal of Hydrogen Energy*. 2019; 44(7):3580-3593. DOI: 10.1016/j.ijhydene.2018.12.024. EDN WVXWOF.

Поступила 19.08.2025, после доработки 20.08.2025;

принята к публикации 21.08.2025

Received August 19, 2025; Received in revised form August 20, 2025;

Accepted August 21, 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

Анализ применимости моделей управления системой профилактики пожаров

Георгий Николаевич Лахвицкий ✉

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

АННОТАЦИЯ

Введение. В современных условиях регулирование обстановки с пожарами осуществляется путем реализации двух основных направлений: профилактики и создания системы обеспечения пожарной безопасности. Создание системы обеспечения пожарной безопасности обеспечивается собственником объекта, а вопросы пожарной профилактики обеспечиваются широким кругом субъектов.

Цели и задачи. Задача исследования состоит в поиске модели управления системой профилактики пожаров, обеспечивающей регулирование обстановки с пожарами и их последствиями.

Материалы и методы. Проведен экспертный опрос, сформулированы 4 математические модели регулирования обстановки с пожарами. Обеспечена проверка и интерпретация результатов, при этом условию применимости в современной практической деятельности соответствует только одна математическая модель, основанная на взаимосвязи профилактики пожаров и интегральных пожарных рисков. В ходе исследования применены методы статистического анализа (дисперсионный, корреляционный и регрессионный) данных.

Результаты и их обсуждение. Сравнение величины интегральных пожарных рисков возможно только для территорий, на которых обеспечивается единый порядок учета пожаров. Обоснована классификация муниципальных образований на три основные группы (городские, смешанные и сельские), в которых уровень взаимосвязи между количеством профилактической работы и величиной интегральных пожарных рисков имеет существенные различия.

Наибольший уровень корреляции наблюдается между количеством профилактической работы и риском для человека погибнуть при пожаре. А величина коэффициента детерминации находится на приемлемом уровне (более 0,5) только для населенных пунктов типов «смешанные» и «сельские».

Выводы. Для управления организационной системой профилактики пожаров приемлема модель, основанная на взаимосвязи величины пожарных рисков и количества профилактической работы, основанной на методах статистического анализа. Предложенная модель имеет статистическую погрешность около 20 %, что приемлемо для краткосрочных прогнозов. Вместе с тем необходимо учитывать, что данная модель не обладает достаточной надежностью для оценки аналогичной взаимосвязи в населенных пунктах типа «городские».

Ключевые слова: интегральные пожарные риски; пожарная опасность территорий; профилактика пожаров; эффективность пожарной профилактики

Для цитирования: Лахвицкий Г.Н. Анализ применимости моделей управления системой профилактики пожаров // Пожаровзрывобезопасность/Fire and Explosion Safety. 2025. Т. 34. № 5. С. 79–92. DOI: 10.22227/0869-7493.2025.34.05.79-92

✉ Лахвицкий Георгий Николаевич, e-mail: egor70288@mail.ru

Analysis of the applicability of fire prevention system management models

Georgy N. Lakhvitsky ✉

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. In modern conditions, the regulation of the fire situation is carried out through the implementation of two main directions: prevention and the creation of a fire safety system. The creation of a fire safety system is provided by the owner of the facility, and fire prevention issues are provided by a wide range of subjects.

Goals and objectives. The purpose of the research is to find a management model for the fire prevention system that regulates the situation with fires and their consequences.

Materials and methods. An expert survey was conducted, and 4 mathematical models for regulating the fire situation were formulated. Verification and interpretation of the results are provided, while only one mathematical model based on the relationship between fire prevention and integral fire risks corresponds to the condition of applicability in modern practice. The methods of statistical analysis (variance, correlation and regression) of the data were applied in the course of the study.

Results and their discussion. Comparison of the magnitude of integral fire risks is possible only for territories where a uniform fire accounting procedure is provided. The classification of municipalities into three main groups (urban, mixed and rural) is substantiated, in which the level of relationship between the amount of preventive work and the magnitude of integral fire risks has significant differences.

The highest level of correlation is observed between the amount of preventive work and the risk of a person dying in a fire. And the value of the coefficient of determination is at an acceptable level (more than 0.5) only for settlements of the "mixed" and "rural" types.

Conclusions. To manage the organizational system of fire prevention, a model based on the relationship between the magnitude of fire risks and the amount of preventive work based on statistical analysis methods is acceptable. The proposed model has a statistical error of about 20 %, which is acceptable for short-term forecasts. However, it should be borne in mind that this model does not have sufficient reliability to assess a similar relationship in urban settlements.

Keywords: integral fire risks; fire danger of territories; fire prevention; effectiveness of fire prevention

For citation: Lakhvitsky G.N. Analysis of the applicability of fire prevention system management model. *Pozharovzryvo-bezopasnost/Fire and Explosion Safety*. 2025; 34(5):79-92. DOI: 10.22227/0869-7493.2025.34.05.79-92 (rus).

✉ Georgy Nikolaevich Lakhvitsky, e-mail: egor70288@mail.ru

Введение

Проблеме пожаров и их последствий (гибели, травмирования и материального ущерба) уделяется пристальное внимание. Усилия пожарных всего мира направлены на сокращение количества пожаров и смягчение их последствий. На международном уровне^{1,2} сформулировано 5 принципов пожарной безопасности, которые применяются на каждом этапе жизненного цикла объекта защиты:

1. Профилактика пожаров.
2. Обнаружение пожара и оповещение о нем.
3. Пассивная (например, создание путей эвакуации) и активная (например, системы противодымной вентиляции) защита.
4. Ограничение распространения пожара.
5. Пожаротушение.

Соблюдение и выполнение на практике перечисленных принципов позволяет добиться улучшения обстановки с пожарами.

¹ International Fire Safety Standards: Common Principles. Safe Buildings Save Lives International Fire Safety Standards Coalition. 1st ed. (Международные стандарты пожарной безопасности: общие принципы. Международная коалиция по стандартам пожарной безопасности «Безопасные здания спасают жизни»). 1-е изд.). Published by the International Fire Safety Standards Coalition (IFSSC). ISBN 978-1-78321-384-9. URL: <https://ifss-coalition.org/> (URL: https://unece.org/DAM/hlm/documents/Standards/UNECE_International_Fire_Safety_Standards_October_2020.pdf).

² Записка Комитета по градостроительству, жилищному хозяйству и землепользованию Европейской экономической комиссии Экономического и социального совета Организации объединенных наций. Восемьдесят первая сессия. Женева, 6–8 октября 2020 года. Пункт 6 с) предварительной повестки дня. Обзор осуществления программ работы на 2018–2019 годы и на 2020 год: приемлемое по цене, достаточное, энергоэффективное и здоровое жилье: стандарты пожарной безопасности зданий. ECE/HBP/2020/7. GE. 20-10104 (R) 130820 170820. URL: https://unece.org/fileadmin/DAM/hlm/documents/2020/ECE_HBP_2020_7-R.pdf

Современное российское законодательство также придерживается указанных принципов, при этом они преобразованы в 3 основных направления деятельности: профилактика пожаров, создание системы обеспечения пожарной безопасности и тушение пожаров. В реализации всех трех направлений деятельности прямо или опосредовано участвуют подразделения МЧС России.

Так, профилактика пожаров³ является одной из основных задач пожарной охраны. При этом необходимо учитывать, что профилактическая работа осуществляется большим количеством различных субъектов, так наряду с подразделениями пожарной охраны в ней принимают участие органы государственной власти субъектов Российской Федерации, органы местного самоуправления, подразделения федерального государственного пожарного надзора [1] и различные организации.

Контроль за созданием и состоянием систем обеспечения пожарной безопасности объектов защиты осуществляется подразделениями федерального государственного пожарного надзора. Тушение пожаров и спасение обеспечивается всеми видами пожарной охраны.

Аналогичная систематизация приведена для полномочий органов местного самоуправления в области пожарной безопасности [2].

Регулирование уровня пожарной безопасности территорий предполагается силами системы профилактики пожаров путем реализации первых двух задач: осуществление профилактической работы, создание и контроль за состоянием системы обеспечения

³ О пожарной безопасности : Федеральный закон от 21.12.1994 № 69-ФЗ. Ст. 4. URL: https://www.consultant.ru/document/cons_doc_LAW_5438/3c04604277ae30a43d8d56dcf1c75cc25c5dbe1c/ (дата обращения: 21.06.2025).

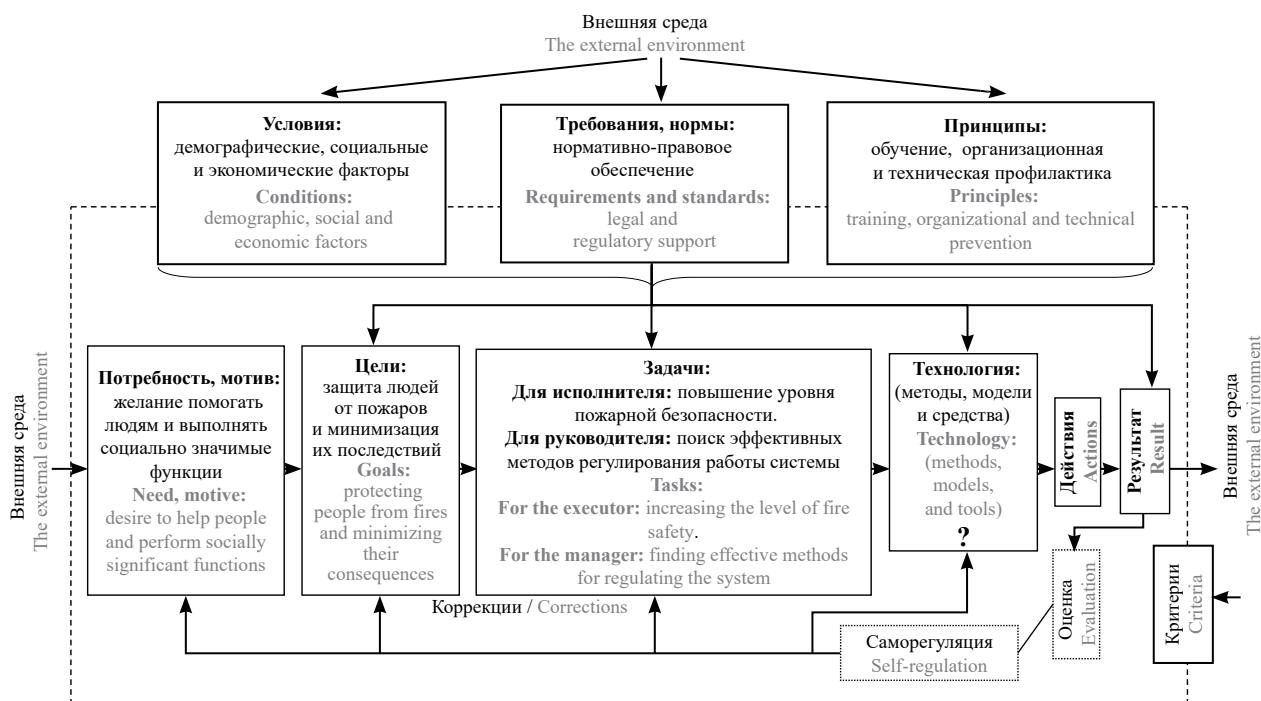


Рис. 1. Структурные компоненты управления системой профилактики пожаров
 Fig. 1. Structural components of fire prevention system management

печения пожарной безопасности, так как тушение пожаров осуществляется только в случаях неэффективности первых двух этапов.

При этом управление деятельностью системы профилактики пожаров и модели принятия решений выстраиваются по схеме, предложенной Д.А. Новиковым [3], определяющей границы внешней среды и взаимосвязи основных компонентов деятельности. Данная схема, адаптированная под решаемую задачу, представлена на рис. 1.

В рассматриваемом случае наиболее сложным для принятия управленческого решения является процесс выбора технологии управления, основанной на эффективной модели.

Материалы и методы

Выбор математических моделей, подходящих для управления системой профилактики пожаров, осуществлен на основании опроса экспертной группы, сформированной в соответствии с работой [4], проведен анализ сложившейся ситуации и предложены возможные модели регулирования количества пожаров и их последствий. Основные этапы, предшествующие принятию конкретного управленческого решения, приведены на рис. 2.

Модель с условным названием «перераспределение нагрузки» предусматривает изучение и оптимизацию трудозатрат инспекторского состава по основным видам деятельности, что в конечном итоге оказывает положительное влияние как на управле-

мость самой системы, так и на уровень пожарной безопасности обслуживаемой подразделением территории [5, 6]. В последние годы численность личного состава подразделений надзорной деятельности МЧС России имеет тенденцию к снижению, что не позволяет качественно и в полном объеме выполнять возложенные функции для регулирования обстановки с пожарами.

Модель с условным названием «оценка инерционности системы» предусматривает исследование вопросов управления пожарной безопасностью на основе контрольно-надзорной деятельности. Данное направление имеет отложенный положительный эффект (трехлетний лаг). То есть увеличение количества контрольных (надзорных) мероприятий приводит к снижению пожаров в трехлетней перспективе [7]. Вместе с тем статистические наблюдения показывают, что в целом тенденция изменения количества пожаров совпадает с прогнозируемой, при этом отклонение прогностической модели от реального количества пожаров составляет около 40 %. Кроме того, политика государства, направленная на снижение количества проверок, делает эту модель практически нежизнеспособной.

Модель управления пожарной безопасностью на основе профилактики пожаров показывает, что подавляющее большинство пожаров происходит в жилом секторе, следовательно, основные усилия должны быть направлены именно на данную категорию объектов. При этом жилые помещения

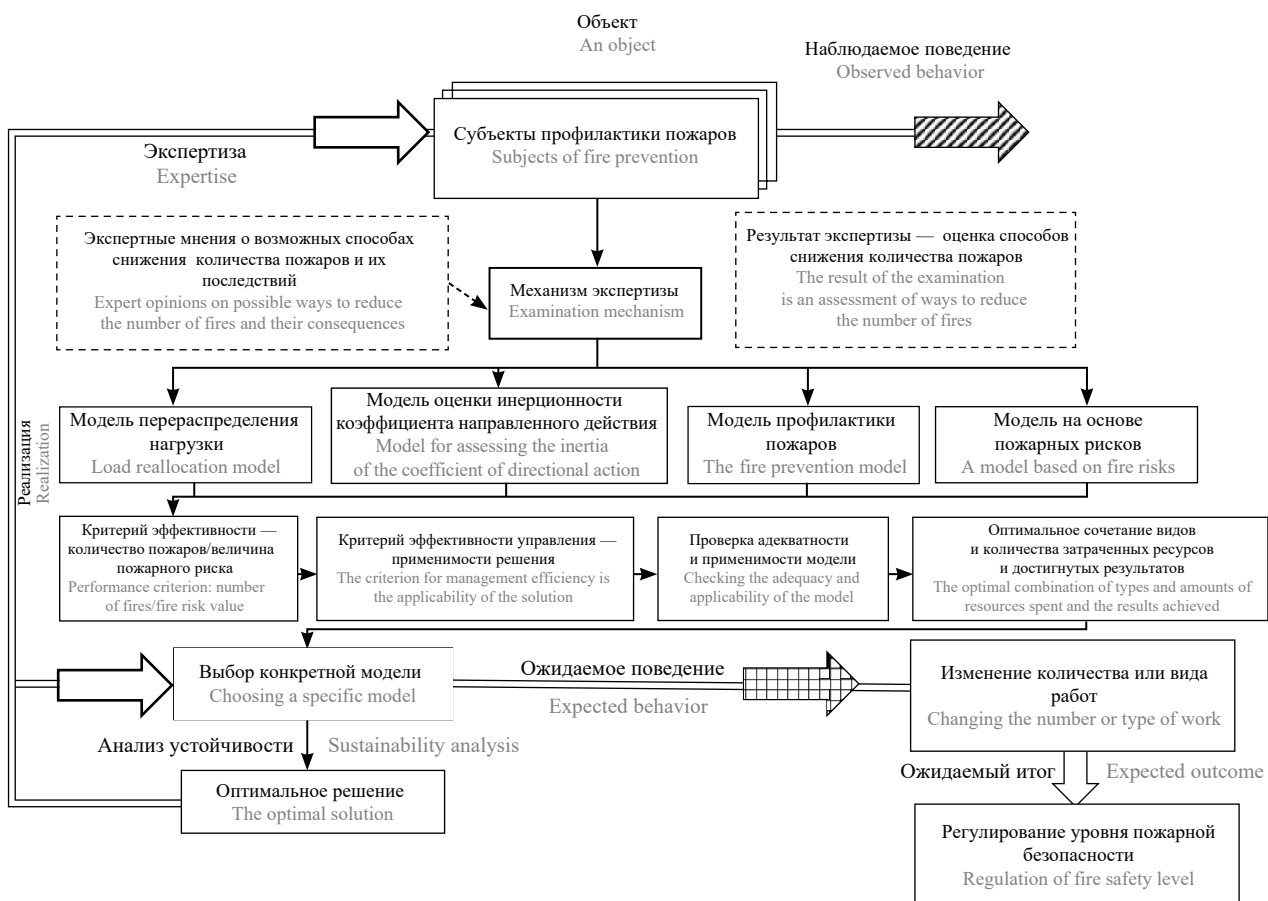


Рис. 2. Этапы выбора и апробации математических моделей
 Fig. 2. Stages of selecting and testing mathematical models

не являются объектом надзора и органы федерального государственного пожарного надзора (ФГПН) не осуществляют профилактику пожаров в них. Таким образом, круг лиц и организаций, входящих в систему управления, значительно возрастает.

Кроме того, исследования взаимосвязи абсолютного количества профилактических мероприятий и пожаров (в том числе гибели) показывают довольно странные результаты. Наиболее эффективными оказываются опосредованные способы взаимодействия с населением [8], такие как: количество кинозалов, в которых перед началом сеансов демонстрируются видеосюжеты о порядке действий в случае возникновения пожара и чрезвычайной ситуации, массовых профилактических мероприятий с детьми, количество участий в заседаниях комиссий по чрезвычайным ситуациям и обеспечению пожарной безопасности.

Кроме того, анализ корреляционных взаимосвязей между абсолютным количеством пожаров, погибших и числом профилактических мероприятий показал, что статистически значимая зависимость имеется. При этом профилактика и численность погибших имеют прямую корреляционную зависимость, т.е. при увеличении количества проинструктированных возрастает и количество погибших, что

противоречит самому смыслу профилактической работы.

Подобные результаты могут являться следствием отсутствия качественного и единообразного учета профилактической работы.

Исследование мировой пожарной статистики⁴ привело к аналогичным результатам. Динамика пожаров в большинстве развитых стран имеет тенденцию к снижению количества как, собственно, пожаров, так и погибших. Однако проводить сравнение обстановки с пожарами в разных странах, основываясь на абсолютных показателях, по меньшей мере не эффективно, поскольку страны имеют разное количество, плотность и структуру населения, различные социально-экономические и географические особенности. Данные тезисы применимы не только для разных стран, но и для регионов внутри страны и даже отдельных территорий внутри одного региона.

Для объективного сравнения применяются показатели пожарного риска [9–11], основными из которых являются:

⁴ Брушлинский Н.Н., Аренис М., Соколов С.В., Вагнер П. World of Fire Statistics. Center of Fire Statistics of CTIF. Report No. 26. М. : Академия ГПС МЧС России, 2021. 66 с. URL: sites/default/files/2021-06/CTIF_Report26_0.pdf

1. Риск для человека оказаться в условиях пожара в единицу времени:

$$R_1^{\text{год}} = \frac{N_{\text{пож}}^{\text{год}}}{N_{\text{н}}^{\text{год}}}, \quad (1)$$

где $N_{\text{пож}}^{\text{год}}$ — количество пожаров, произошедших на территории муниципального образования в текущем году;
 $N_{\text{н}}^{\text{год}}$ — количество населения, проживающего на территории муниципального образования в текущем году.

2. Риск для человека погибнуть при пожаре:

$$R_2^{\text{год}} = \frac{N_{\text{жертв}}^{\text{год}}}{N_{\text{пож}}^{\text{год}}}, \quad (2)$$

где $N_{\text{жертв}}^{\text{год}}$ — количество человек, погибших при пожарах на территории муниципального образования в текущем году.

3. Риск для человека погибнуть от пожара в единицу времени.

$$R_3^{\text{год}} = R_1^{\text{год}} \cdot R_2^{\text{год}}. \quad (3)$$

Исследование динамики пожарных рисков представляется более целесообразным как с точки зрения оценки состояния пожарной безопасности территорий и населенных пунктов, так и с точки зрения оценки эффективности профилактики пожаров.

Результаты и их обсуждение

Для исследования взаимосвязей профилактической работы и величины пожарных рисков разработана соответствующая модель.

Средние значения пожарных рисков за период с 2016 по 2020 г. для стран, схожих с Российской Федерацией по некоторым показателями (социально-экономическим, структурой противопожарной службы и системы профилактики пожаров), представлены в табл. 1 и на рис. 3.

Как видно из представленных таблицы и рисунка, величина риска для человека оказаться в условиях пожара (R_1) в странах Евразийского экономического союза существенно ниже уровня Европейских стран и США, а величина риска для человека погибнуть при пожаре (R_2) и интегрального пожарного риска (R_3), напротив, значительно выше. Подобные различия обусловлены в первую очередь особенностями учета пожаров⁵ [12]. Поэтому сравнение дина-

⁵ Брушлинский Н.Н., Аренс М., Соколов С.В., Вагнер П. World of Fire Statistics. Center of Fire Statistics of CTIF. Report No. 26. М. : Академия ГПС МЧС России, 2017. 56 с. URL: sites/default/files/ctif_report22_world_fire_statistics_2017.pdf

Таблица 1. Средние значения величины пожарных рисков в некоторых странах мира

Table 1. Average values of fire risks in some countries around the world

Страна A country	R_1	R_2	R_3
США USA	$4,02 \cdot 10^{-3}$	$2,65 \cdot 10^{-3}$	$1,06 \cdot 10^{-5}$
Российская Федерация Russian Federation	$1,83 \cdot 10^{-3}$	$4,26 \cdot 10^{-2}$	$5,63 \cdot 10^{-5}$
Германия Germany	$2,62 \cdot 10^{-3}$	$1,66 \cdot 10^{-3}$	$4,29 \cdot 10^{-6}$
Франция France	$4,40 \cdot 10^{-3}$	$8,95 \cdot 10^{-4}$	$3,93 \cdot 10^{-6}$
Велико-британия Great Britain	$3,14 \cdot 10^{-3}$	$1,68 \cdot 10^{-3}$	$5,24 \cdot 10^{-6}$
Польша Poland	$3,56 \cdot 10^{-3}$	$1,05 \cdot 10^{-2}$	$3,59 \cdot 10^{-5}$
Казахстан Kazakhstan	$7,41 \cdot 10^{-4}$	$2,62 \cdot 10^{-2}$	$1,94 \cdot 10^{-5}$
Венгрия Hungary	$2,12 \cdot 10^{-3}$	$5,47 \cdot 10^{-3}$	$1,15 \cdot 10^{-5}$
Беларусь Belarus	$6,39 \cdot 10^{-4}$	$8,90 \cdot 10^{-2}$	$5,68 \cdot 10^{-5}$
Среднее значение The average value	$2,56 \cdot 10^{-3}$	$2,01 \cdot 10^{-2}$	$2,27 \cdot 10^{-5}$

мики изменения величины рисков между странами представляется некорректным.

На всей территории Российской Федерации применяется единый порядок учета пожаров, следовательно, существенная разница в показателях пожарных рисков может быть обусловлена только социально-демографическими и географическими параметрами.

Средние значения пожарных рисков за период с 2018 по 2022 г. в федеральных округах Российской Федерации, рассчитанные на основе данных [9, 13], представлены в табл. 2 и на рис. 4.

При первичном рассмотрении данных табл. 2 и рис. 4 может показаться, что значения величин рисков для человека оказаться в условиях пожара (R_1) и погибнуть при пожаре (R_2) существенно различаются в разных федеральных округах. Однако результаты дисперсионного анализа указывают на то, что статистически значимые различия в средних показателях между федеральными округами, отсутствуют.

При этом исследования динамики изменения пожарных рисков внутри регионов указывают на наличие существенных различий в показателях между различными муниципальными образованиями, что

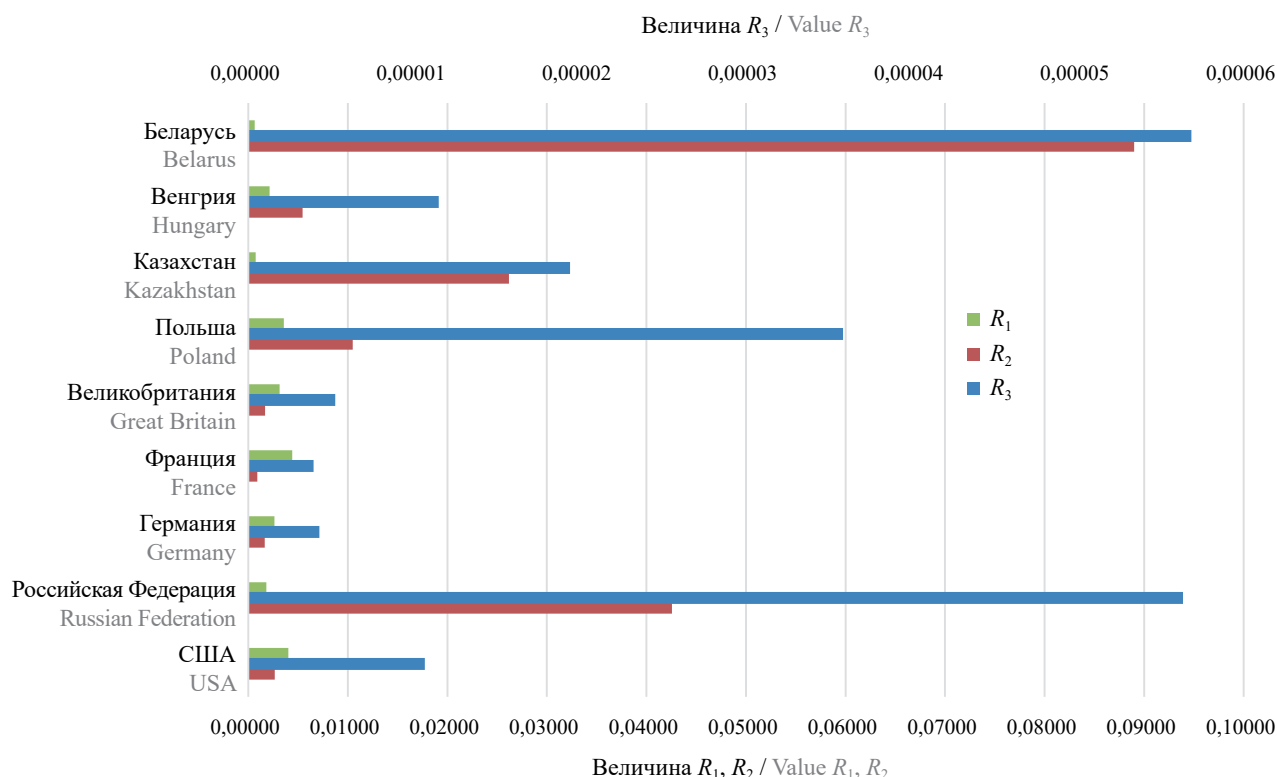


Рис. 3. Средние значения величины пожарных рисков в некоторых странах мира
 Fig. 3. Average values of fire risks in some countries of the world

позволяет ввести их условное деление на городские, смешанные и сельские [9, 14].

Исследования динамики изменения пожарных рисков внутри регионов указывают на наличие существенных различий в показателях между различными муниципальными образованиями. С целью поиска причин различий проведен дисперсионный анализ величин пожарных рисков в некоторых регионах Приволжского федерального округа (Нижегородской области, республиках Башкортостан и Мордовия). Выбор регионов обусловлен размером выборки муниципальных образований. По состоянию на 01.01.2024, по данным Росстата⁶, в Приволжском федеральном округе насчитывается 516 муниципальных образований, при этом необходимо принимать во внимание особенности порядка учета пожаров. Статистика пожаров включает детализированные сведения по муниципальным районам и округам, городским округам, а также районам внутри областных центров и городов регионального значения. Следовательно, размер генеральной совокупности будет составлять 593 единицы.

⁶ URL: https://docviewer.yandex.ru/?url=ya-browser%3A%2F%2F4DT1uXEPRrJRJIUFoewruIssEAZB1cLOF165-TUuewNfxzNqEAR9L3gKckxmw1Ec8gWzID_q1O1f6nD1wpxujzLHta9sPWJ3RMHGViszu9S6Mh3ssQa_w22IUN6tbUadLAnv4WB5LoAtY7azLwLKoA%3D%3D%3Fsign%3DKUxLY30dkPDjSkkn71ke7gChEdcPD4mhlBORVDp3nMg%3D&name=1-adm_2024.xlsx

Таблица 2. Средние значения величины пожарных рисков в федеральных округах Российской Федерации
 Table 2. Average values of fire risk in the federal districts of the Russian Federation

Федеральный округ / Federal District	R ₁	R ₂	R ₃
Северо-западный / North-Western	2,39 · 10 ⁻³	2,89 · 10 ⁻²	6,03 · 10 ⁻⁵
Центральный / Central	5,33 · 10 ⁻³	2,42 · 10 ⁻²	4,76 · 10 ⁻⁵
Приволжский / Volga	2,16 · 10 ⁻³	3,49 · 10 ⁻²	6,45 · 10 ⁻⁵
Южный / Southern	2,15 · 10 ⁻³	2,73 · 10 ⁻²	4,39 · 10 ⁻⁵
Северо-Кавказский / North Caucasian	1,38 · 10 ⁻³	1,62 · 10 ⁻²	1,70 · 10 ⁻⁵
Уральский / Ural	2,45 · 10 ⁻³	3,05 · 10 ⁻²	6,27 · 10 ⁻⁵
Сибирский / Siberian	3,48 · 10 ⁻³	2,35 · 10 ⁻²	6,07 · 10 ⁻⁵
Дальневосточный / Far Eastern	5,00 · 10 ⁻³	2,09 · 10 ⁻²	8,18 · 10 ⁻⁵

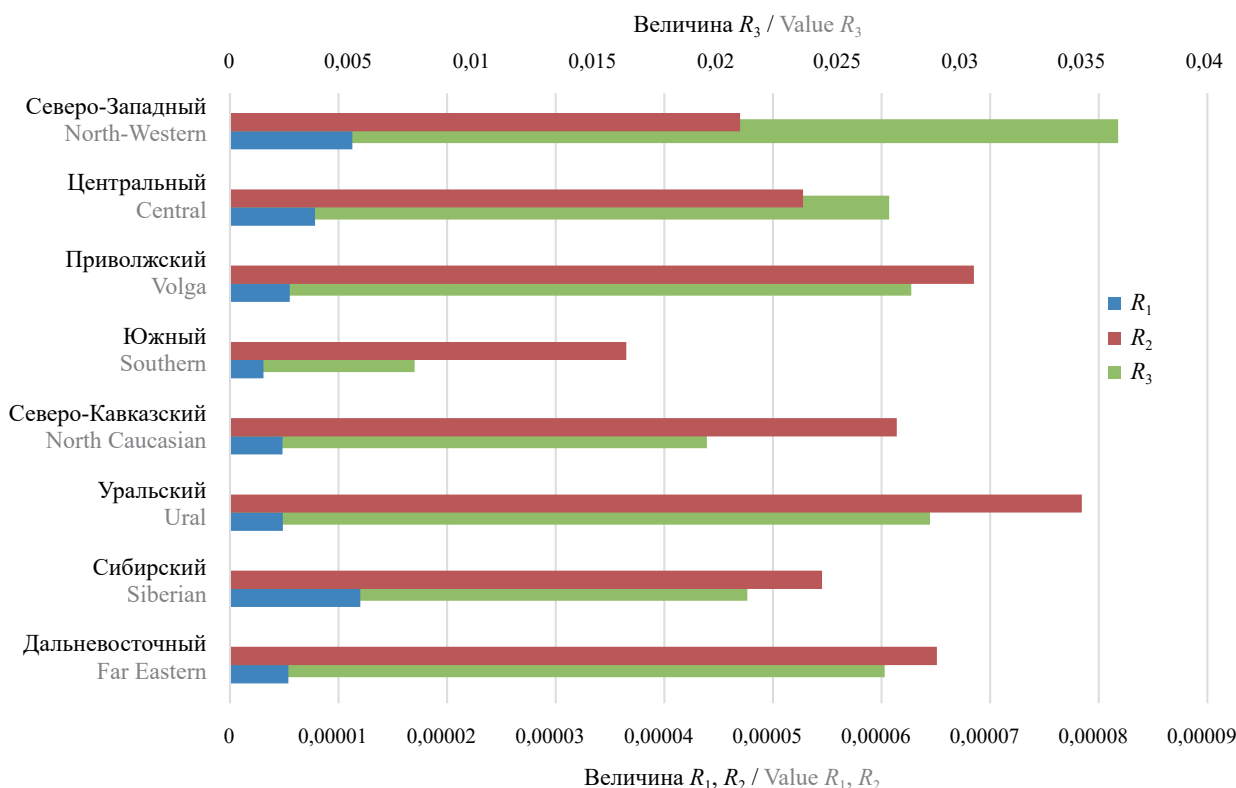


Рис. 4. Средние значения величины пожарных рисков в федеральных округах Российской Федерации
 Fig. 4. Average values of fire risk in the federal districts of the Russian Federation

Таким образом, для получения статистически значимых результатов с уровнем доверительной вероятности не ниже 95 % и доверительным интервалом в 7 % размер выборки муниципальных образований должен составлять не менее 147 единиц. Суммарное количество муниципальных образований Нижегородской области, Республик Башкортостан и Мордовия составляет 150 единиц, что позволяет строить достоверные прогнозы на основе данных регионов.

Анализ данных о величинах риска в муниципальных образованиях указывает на высокую межгрупповую дисперсию, что свидетельствует о наличии статистически значимых различий в средних показателях рисков между типами муниципальных образований. Обобщенные (за три региона) данные приведены в табл. 3, ящиковые диаграммы показателей R_1 , R_2 , R_3 приведены на рис. 5.

Более детальное рассмотрение показателей пожарных рисков различных типов муниципальных образований (внутри исследуемых регионов) позволяет сделать вывод, что в величинах их средних показателей наблюдаются статистически значимые различия. Исключение составляют значения R_2 , R_3 в Республике Мордовия. Эти данные свидетельствуют, что в регионах с преимущественно сельскохозяйственным складом экономики принципиальные различия в типах муниципальных образований (с точки зрения пожарной безопасности) отсутствуют.

Анализ научных исследований, посвященных проблемам отечественной и мировой практики профилактики пожаров, показывает, что в основном они отражают вопросы периодизации профилактической работы [15, 16], ее сезонных особенностей [17, 18], классификации групп целевой аудитории [19–21], методов [22, 23] и способов [24, 25] донесения информации. Фокус некоторых зарубежных исследований в последние годы смещается к поиску взаимосвязи систем пожарной автоматики и последствий (гибель и травмирование людей) пожаров [26–28]. Вместе с тем большинство исследователей считают личное взаимодействие государственных органов и населения по вопросам обеспечения пожарной безопасности необходимым и важным [29–31], при этом особое внимание уделяется двум группам риска: детям [32–34] и пожилому населению [35, 36].

Вместе с тем выдвигается тезис о необходимости оценки эффективности профилактических мероприятий [37, 18] для совершенствования планирования профилактической деятельности. При этом основной целью оценки эффективности является минимизация потерь (гибели людей) при ограниченных трудовых ресурсах. В качестве критерия эффективности выбирается отношение трудозатрат к снижению совокупных потерь.

В работе [38] определение эффективности профилактического мероприятия осуществляется на

Таблица 3. Обобщенные данные дисперсионного анализа величин пожарных рисков в различных типах муниципальных образований регионов Приволжского федерального округа

Table 3. Generalized data on the dispersion analysis of fire risk values in various types of municipalities in the Volga Federal District

Источник вариации The source of the variation	df	MS	F	P-значение P-value	F критическое F critical
<i>Дисперсионный анализ R₁ / Analysis of variance R₁</i>					
Между группами / Between groups	2	1,01 · 10 ⁻⁴	28,559	1,12 · 10 ⁻¹²	3,007
Внутри групп / Within groups	747	3,54 · 10 ⁻⁶			
Итого / Total	749	–			
<i>Дисперсионный анализ R₂ / Analysis of variance R₂</i>					
Между группами / Between groups	2	5,18 · 10 ⁻³	7,308	7,28 · 10 ⁻⁴	3,009
Внутри групп / Within groups	747	7,09 · 10 ⁻⁴			
Итого / Total	749	–			
<i>Дисперсионный анализ R₃ / Analysis of variance R₃</i>					
Между группами / Between groups	24	1,77 · 10 ⁻⁸	2,263	2,6 · 10 ⁻³	1,626
Внутри групп / Within groups	100	7,82 · 10 ⁻⁹			
Итого / Total	124	–			

основе методов корреляционного и регрессионного анализа.

Для проведения исследования введено понятие «количество профилактической работы», под которым понимается относительный показатель ($P_{и}$) — вероятность человека, проживающего на определенной территории в течение определенного года, стать объектом профилактической работы. Данный показатель определяется отношением количества проинструктированных за единицу времени граждан к общему числу жителей, проживающих в муниципальном образовании.

$$P_{и}^{год} = \frac{N_{инстр}^{год}}{N_{н}^{год}}, \quad (4)$$

где $N_{инстр}^{год}$ — количество людей, ставших объектами пожарно-профилактической работы в текущем году;

$N_{н}^{год}$ — количество населения, проживающего на территории муниципального образования в текущем году [39].

Уровень корреляции определялся для каждого муниципального образования в отдельности по данным за пятилетний период (с 2019 по 2023 г.). Полученные сведения объединены по группам муниципальных образований (городские, смешанные, сельские), результаты представлены в табл. 4, где представлен медианный уровень корреляции внутри группы.

Исследование показало, что корреляция между $P_{и}$ и R_1 находится на очень слабом уровне (по качественной шкале Чеддока), уровень корреляции между $P_{и}$ и R_2 находится в диапазоне от 0,569 до 0,818, что соответствует среднему и высокому уровню (по качественной шкале Чеддока), уро-

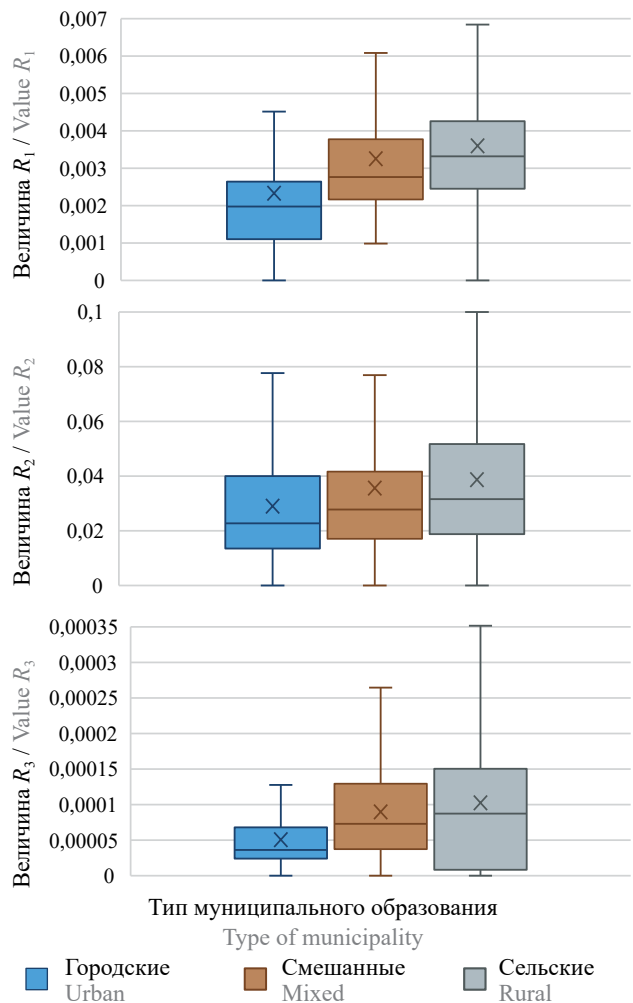


Рис. 5. Ящичковые диаграммы показателей R_1, R_2, R_3 в регионах Приволжского федерального округа (Нижегородской области, республиках Башкортостан и Мордовия)

Fig. 5. Box charts of R_1, R_2, R_3 indicators in the regions of the Volga Federal District (Nizhny Novgorod Region, the republics of Bashkortostan and Mordovia)

вень корреляции между $P_{и}$ и R_3 находится в диапазоне от 0,566 до 0,786, что соответствует среднему и высокому уровню (по качественной шкале Чеддока).

Необходимо отметить, что между $P_{и}$ и R_2 , R_3 наблюдается обратная корреляция, следовательно, при увеличении количества профилактической работы величина риска уменьшается. Данный факт и является целевой функцией профилактики.

Дисперсионный анализ уровней корреляции групп населенных пунктов в различных регионах показал, что статистически значимые различия в средних показателях отсутствуют, при этом между группами дисперсия присутствует, что в очередной раз подтверждает обоснованность классификации населенных пунктов.

Таким образом, величина интегрального пожарного риска может регулироваться путем увеличения количества профилактической работы не в абсолютных показателях, а относительно численности населения.

Необходимо отметить, что наибольший уровень корреляции наблюдается между количеством профилактической работы и риском для человека погибнуть при пожаре. А величина коэффициента детерминации находится на приемлемом уровне (более 0,5) для населенных пунктов типа «смешанные» и «сельские» (рис. 6).

Таким образом, имеющиеся данные показывают, что предлагаемая модель регрессии величины R_2 будет приемлема. Данная модель на 58 и 62 % зависит от учтенных в ней факторов.

Таблица 4. Сводные данные по уровню корреляции между количеством профилактической работы и интегральных пожарных рисков

Table 4. Summary data on the level of correlation between the amount of preventive work and integral fire risks

Количество профилактической работы The amount of preventive work	Пожарные риски Fire risks		
	R_1	R_2	R_3
$P_{и}$ (городские) P_i (urban)	-0,013	-0,645	-0,605
$P_{и}$ (смешанные) P_i (mixed)	0,023	-0,760	-0,727
$P_{и}$ (сельские) P_i (rural)	0,086	-0,788	-0,720

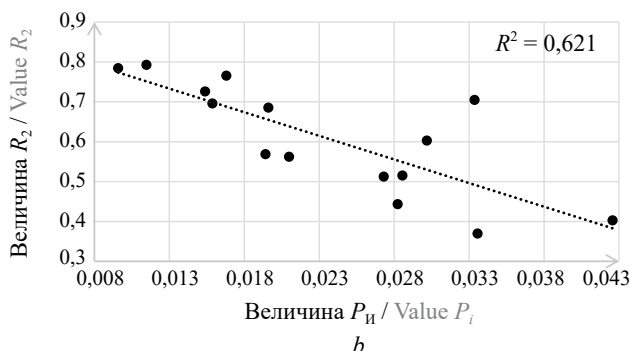
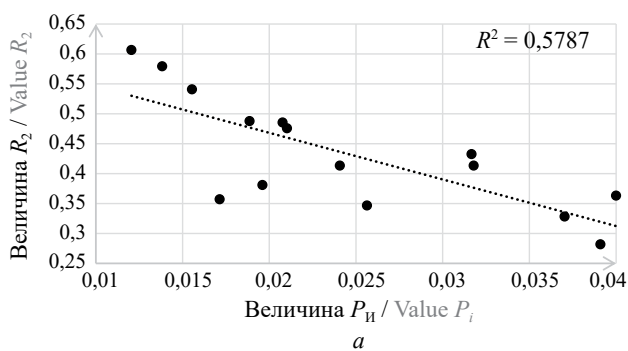


Рис. 6. Коэффициент детерминации для различных типов муниципальных образований: а — смешанные; б — сельские
Fig. 6. Determination coefficient for different types of municipalities: a — mixed; b — rural

Модель регрессии построена по медианным значениям величины R_2 внутри исследуемых регионов для смешанных и сельских муниципальных образований, полученные уравнения регрессии имеют следующий вид:

для смешанных муниципальных образований:

$$Y = 0,056668 - 0,07423 \cdot X; \quad (5)$$

для сельских муниципальных образований:

$$Y = 0,05543 - 0,05242 \cdot X. \quad (6)$$

Уравнения (5) и (6) выражают зависимость величины риска для человека погибнуть при пожаре в смешанных и сельских населенных пунктах (Y) от величины $P_{и}$ (X).

Коэффициенты 0,056668 и 0,05543 показывают, каким будет $Y(R_2)$, если величина $P_{и}$ в рассматриваемой модели будет равна 0. Коэффициенты (-0,07423 и -0,05242) показывают, на сколько уменьшится величина R_2 , если величина $P_{и}$ в рассматриваемой модели будет равна 1, а равно и определить прогнозируемую величину R_2 при заданном $P_{и}$.

Сравнительный анализ фактических и прогнозируемых значений R_2 для смешанных и сельских населенных пунктов приведен на рис. 7.

Величина средних отклонений между фактическими и прогнозируемыми величинами составляет 17,6 и 18,6 % соответственно, что вполне приемлемо для краткосрочных прогнозов.

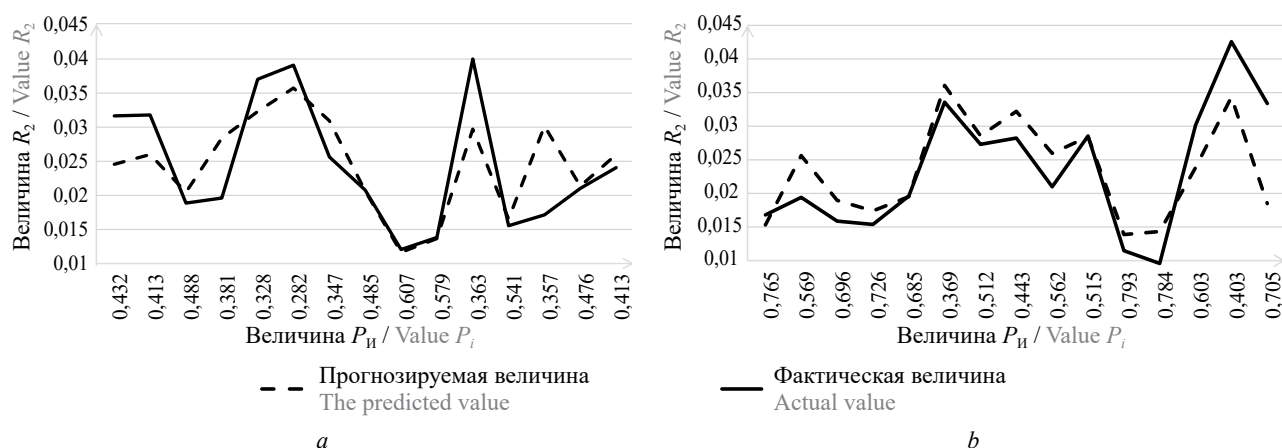


Рис. 7. График фактической и прогнозируемой величины R_2 в зависимости от P_i : а — смешанные; б — сельские
 Fig. 7. Graph of the actual and predicted R_2 values depending on the P_i : а — mixed; б — rural

Выводы

Проведенное исследование показывает, что для управления организационной системой профилактики пожаров приемлема модель, основанная на взаимосвязи величины пожарных рисков и количества профилактической работы, основанной на методах статистического анализа (дисперсионного, корреляционного и регрессионного). При этом предложенная модель имеет статистическую погрешность около 20 %, что приемлемо для краткосрочных прогнозов. Кроме того, устойчивая, статистически значимая взаимосвязь наблюдается только между профилактикой пожаров и риском для человека погибнуть при пожаре в населенных пунк-

тах типов «смешанные» и «сельские». Представляется, что для населенных пунктов типа «городские» существует нелинейная взаимосвязь [40].

Предложенная модель позволяет проводить объективные сравнения уровня пожарной безопасности различных регионов, муниципальных образований и даже отдельных территорий, а также оценку степени влияния профилактических мероприятий на величину интегральных пожарных рисков.

Вместе с тем применение данной модели представляет определенную сложность в связи с множественностью субъектов профилактической работы, а также отсутствием единых баз данных учета профилактической работы и сведений, необходимых для оценки величин интегральных пожарных рисков территорий.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Мочалова Т.А., Миронова Н.В. Профилактика правонарушений, связанных с пожарами // Молодые ученые в решении актуальных проблем безопасности : сб. мат. XII Всеросс. науч.-практ. конф. Железнодорожск, 2023. С. 152–154. EDN SWMVDZ.
2. Володченкова В.В., Перегудова Н.В., Кононко П.П., Гаврюшенко В.П. Оценка деятельности органов местного самоуправления в области пожарной безопасности: актуальные проблемы и пути их решения // Административное и муниципальное право. 2023. № 5. С. 80–92. DOI: 10.7256/2454-0595.2023.5.44118. EDN JHLWGZ.
3. Новиков Д.А. Теория управления организационными системами. 4-е изд., испр. и дополн. М. : ЛЕНАНД, 2022. 500 с.
4. Воронин С.А., Лахвицкий Г.Н., Репин С.В., Сатин А.П. Использование метода экспертных оценок при оценке трудозатрат сотрудников государственного пожарного надзора // Пожары и чрезвычайные ситуации: предотвращение, ликвидация. 2023. № 1. С. 78–88. DOI: 10.25257/FE.2023.1.78-88. EDN XYLEEW.
5. Преображенская Е.С., Загуменнова М.В., Фирсов А.Г., Надточий О.В. Нагрузка на инспекторский состав государственного пожарного надзора в 2022 году // Актуальные вопросы естествознания : сб. мат. VIII Всеросс. науч.-практ. конф. Иваново, 2023. С. 295–300. EDN IDYFVU.
6. Сатин А.П., Бурлаченко К.Г., Репин С.В. Некоторые особенности устойчивого функционирования подразделения надзорной деятельности // Технологии техносферной безопасности. 2021. № 3 (93). С. 42–60. DOI: 10.25257/TTS.2021.3.93.42-60. EDN OVOPHC.
7. Кистанова Л.А., Репин С.В., Болдыревский П.Б., Лахвицкий Г.Н. Математико-статистическая модель прогнозирования количества пожаров для использования в системе МЧС России // Моделирование, оптимизация и информационные технологии. 2022. № 10 (2–37). DOI: 10.26102/2310-6018/2022.37.2.002. EDN MIPRVJ.

8. Зобков Д.В., Присяжнюк Н.Л., Таныгина А.А. Многофакторная математическая модель зависимости ожидаемого сокращения интегрального ущерба от ряда профилактических мероприятий в жилом секторе России // Технологии техносферной безопасности. 2022. № 3 (97). С. 100–118. DOI: 10.25257/TTS.2022.3.97.100-118. EDN DLR SOG.
9. Сатин А.П., Лахвицкий Г.Н. Перспективный алгоритм расчета и визуализации величины пожарных рисков в геоинформационной системе // Системы безопасности : мат. Междунар. науч.-техн. конф. 2024. № 33–1. С. 107–111. EDN B BGOJD.
10. Пожарные риски. Динамика, управление, прогнозирование / под ред. Н.Н. Брушлинского и Ю.Н. Шебеко. М. : ФГУ ВНИИПО, 2007. 370 с.
11. Брушлинский Н.Н., Соколов С.В., Клепко Е.А., Белов В.А., Иванова О.В., Попков С.Ю. Основы теории пожарных рисков и ее приложения. М. : Академия ГПС МЧС России, 2012. 192 с.
12. Брушлинский Н.Н., Соколов С.В., Григорьева М.П., Вагнер П. Как создавалась мировая пожарная статистика // Пожары и чрезвычайные ситуации: предотвращение, ликвидация. 2024. № 1. С. 69–77. DOI: 10.25257/FE.2024.1.69-77. EDN LGGRKF.
13. Гончаренко В.С., Чечетина Т.А., Сибирко В.И., Надточий О.В., Полехин П.В., Козлов А.А. и др. Пожары и пожарная безопасность в 2022 году // Информационно-аналитический сборник. Балашиха : ФГБУ ВНИИПО МЧС России, 2023. 80 с. EDN IKFNVG.
14. Сатин А.П., Лахвицкий Г.Н., Репин С.В., Воронин С.А. Оценка интегральных пожарных рисков в муниципальных образованиях Нижегородской области // Современные проблемы гражданской защиты. 2023. № 2 (47). С. 38–45. EDN HRMZIE.
15. Жилин О.И. Системный подход к противопожарной пропаганде и обучению мерам пожарной безопасности — важнейшая составляющая деятельности по профилактике пожаров // Пожаровзрывобезопасность / Fire and explosion safety. 2009. № 8 (18). С. 33–37. EDN KWXHVV.
16. Kendrick D., Young B., Mason-Jones A.J., Ilyas N., Achana F.A., Cooper N.J. et al. Home safety education and provision of safety equipment for injury prevention // Evidence-Based Child Health : a Cochrane Review Journal. 2013. No. 8 (3). Pp. 761–939. DOI: 10.1002/ebch.1911
17. Головин Н.Л. Воспитание культуры безопасности жизнедеятельности в области образования, социальной рекламы и профилактики пожаров // Педагогический журнал. 2020. № 10 (6–1). С. 38–49. DOI: 10.34670/AR.2020.64.64.005. EDN ZCXYMM.
18. Runefors M., Johansson N., van Hees P. The effectiveness of specific fire prevention measures for different population groups // Fire Safety Journal. 2017. No. 91. Pp. 1044–1050. DOI: 10.1016/j.firesaf.2017.03.064. EDN VDFVWV.
19. Макарова Т.П., Батура А.Н., Ширинкин П.В. Подход к использованию социологических исследований при совершенствовании профилактической деятельности в области пожарной безопасности // Техносферная безопасность. 2020. № 3 (28). С. 150–157. EDN MEASMG.
20. Al-Hajj S., Desapriya E., Pawliuk C., Garis L., Pike I. Interventions for Preventing Residential Fires in Vulnerable Neighbourhoods and Indigenous Communities: A Systematic Review of the Literature // International Journal of Environmental Research and Public Health. 2022. No. 19 (9). P. 5434. DOI: 10.3390/ijerph19095434. EDN FZACLD.
21. Hwang V., Duchossois G.P., Garcia-Espana J.F., Durbin D.R. Impact of a community based fire prevention intervention on fire safety knowledge and behavior in elementary school children // Injury Prevention. 2006. No. 12 (5). Pp. 344–346. DOI: 10.1136/ip.2005.011197
22. Фролов Н.Н., Бобин А.В., Лазовский А.А., Комогорцев С.И., Сивокозов С.В. Роль профилактических мероприятий, направленных на предупреждение гибели и травмирования людей на пожарах // Проблемы науки. 2022. № 6 (74). С. 17–21. EDN EYEWYF.
23. Gielen A.C., Shields W., Frattaroli Sh., McDonald E., Jones V., Bishai D. et al. Enhancing fire department home visiting programs: Results of a community intervention trial // Journal of Burn Care & Research. 2013. No. 34 (4). Pp. e250–e256. DOI: 10.1097/BCR.0b013e3182685b3a
24. Ашмарин В.В., Филиппов З.С., Филиппова О.А. Профилактические и организационные меры по предупреждению пожаров на производстве и в быту // Процессы техносферы: региональный аспект : сб. мат. V Всерос. науч.-практ. конф. Чебоксары : Чувашский государственный университет им. И.Н. Ульянова, 2022. С. 27–35. EDN MOCGBL.
25. Al-Hajj S., Thomas L., Morris Sh., Clare J., Jennings Ch., Biantoro Ch. et al. Community Fire Risk Reduction: Longitudinal Assessment for HomeSafe Fire Prevention Program in Canada // International Journal of Environmental Research and Public Health. 2023. No. 20 (14). P. 6369. DOI: 10.3390/ijerph20146369. EDN IZRVNR.
26. Duchossois G.P., Nance M.L., Garcia-Espana J.F., Flores J. Sustainability of an In-Home Fire Prevention Intervention // Journal of Trauma Nursing. 2009. No. 16 (4). Pp. 194–198. DOI: 10.1097/JTN.0b013e3181ca0876

27. Festag S. Analysis of the effectiveness of the smoke alarm obligation — Experiences from practice // *Fire Safety Journal*. 2021. No. 119. P. 103263. DOI: 10.1016/j.firesaf.2020.103263. EDN SEMGQH.
28. Tannous W.K., Whybro M., Lewis C., Ollerenshaw M., Watson G., Broomhall S. et al. Using a cluster randomized controlled trial to determine the effects of intervention of battery and hardwired smoke alarms in New South Wales, Australia: Home fire safety checks pilot program // *Journal Safety Research*. 2016. No. 56. Pp. 23–27. DOI: 10.1016/j.jsr.2015.11.001
29. Setien M.A., Han D., Zuniga G.C., Mier N., Lucio R.L., Treviño L. Does Injury Prevention Education Initiate Household Changes in a Spanish-Speaking Minority Population? // *Journal of Community Heal*. 2014. No. 39 (1). Pp. 167–172. DOI: 10.1007/s10900-013-9755-0. EDN MDTMQO.
30. Sund B., Bonander C., Jakobsson N., Jaldell H. Do home fire and safety checks by on-duty firefighters decrease the number of fires? Quasi-experimental evidence from Southern Sweden // *Journal of Safety Research*. 2019. No. 70. Pp. 39–47. DOI: 10.1016/j.jsr.2019.04.006
31. Tannous W.K., Agho K. Domestic fire emergency escape plans among the aged in NSW, Australia: The impact of a fire safety home visit program // *BMC Public Health*. 2019. No. 19 (1). P. 872. DOI: 10.1186/s12889-019-7227-x. EDN UHNJTE.
32. Joffe H., Perez-Fuentes G., Potts H.W.W., Rossetto T. How to increase earthquake and home fire preparedness: The fix-it intervention // *Natural Hazards*. 2016. No. 84 (3). Pp. 1943–1965. DOI: 10.1007/s11069-016-2528-1. EDN IVHBEN.
33. Pooley K., Nunez S., Whybro M. Evidence-based practices of effective fire safety education programming for children // *Australian Journal of Emergency Management*. 2021. No. 36 (2). Pp. 34–41. DOI: 10.47389/36.2.34
34. King W.J., Klassen T.P., LeBlanc J., Bernard-Bonnin A.-C., Robitaille Y., Pham B. et al. The Effectiveness of a Home Visit to Prevent Childhood Injury // *Pediatrics*. 2001. No. 108 (2). Pp. 382–388. DOI: 10.1542/peds.108.2.382
35. Lehna C., Merrell J., Furmanek S., Twyman S. Home fire safety intervention pilot with urban older adults living in Wales // *Burn. Journal of the International Society for Burn Injuries*. 2017. No. 43. Pp. 69–75. DOI: 10.1016/j.burns.2016.06.025
36. Smith G.A., Kistamgari S., Splaingard M. Optimizing Smoke Alarm Signals for Those at Highest Risk for Residential Fire-Related Death: Testing the Effectiveness of Children’s Smoke Alarms for Sleeping Older Adults // *Fire Technology*. 2021. No. 58. Pp. 311–326. DOI: 10.1007/s10694-021-01147-5
37. Прус Ю.В., Чистякова А.А., Россинская К.Г. Управление профилактической деятельностью на основе матричного представления рисков // *Техносферная безопасность*. 2019. № 4 (25). С. 43–50. EDN XLVXHY.
38. Андреев Ю.А., Елфимова М.В., Мельник А.А., Ширинкин П.В., Батуро А.Н. О возможном подходе к оценке эффективности и востребованности профилактических мероприятий в области пожарной безопасности // *Современные проблемы гражданской защиты*. 2018. № 2 (27). С. 56–61. EDN XWXQBN.
39. Лахвицкий Г.Н. Анализ влияния профилактической работы на динамику пожаров на основе статистических данных // *Сибирский пожарно-спасательный вестник*. 2023. № 3 (30). С. 65–72. DOI: 10.34987/vestnik.sibpsa.2023.30.3.007. EDN JYHOSB.
40. Авдеенко А.М., Сатин А.П., Нгуен В.А. Особенности выбора нейронных сетей для оценки эффективности профилактических мероприятий // *Технологии техносферной безопасности*. 2024. № 3 (105). С. 55–68. DOI: 10.25257/TTS.2024.3.105.55-68. EDN UNVUHM.

REFERENCES

1. Mochalova T.A., Mironova N.V. Prevention of fire-related crimes. Young scientists in solving urgent security problems : *Collection of materials of the XII All-Russian scientific and practical conference*. Zheleznogorsk, 2023; 152-154. EDN SWMVDZ. (rus).
2. Volodchenkova V.V., Peregodova N.V., Kononko P.P., Gavryushenko V.P. Assessment of the activities of local self-government bodies in the field of fire safety: current problems and ways to solve them. *Administrative and Municipal law*. 2023; 5:80-92. DOI: 10.7256/2454-0595.2023.5.44118. EDN JHLWGZ. (rus).
3. Novikov D.A. *Theory of management of organizational systems. 4th Edition, Revised and Expanded*. Moscow, LENAND, 2022; 500.
4. Voronin S.A., Lakhvicky G.N., Repin S.V., Satin A.P. Using the expert estimation method in assessing labor costs of the state fire supervision personnel. *Fires and emergencies: prevention, elimination*. 2023; 1:78-88. DOI: 10.25257/FE.2023.1.78-88. EDN XYLEEW. (rus).
5. Preobrazhenskaya E.S., Zagumennova M.V., Firsov A.G., Nadtochiy O.V. Burden on the inspection staff of the state fire supervision in 2022. *Current Issues in Natural Science : Collection of Proceedings of the VIII All-Russian Scientific and Practical Conference*. Ivanovo, 2023; 295-300. EDN IDYFVU. (rus).
6. Satin A.P., Burlachenko K.G., Repin S.V. Some features of sustainable functioning of the supervision division. *Technology of technosphere safety*. 2021; 3(93):42-60. DOI: 10.25257/TTS.2021.3.93.42-60. EDN OVOPHC. (rus).

7. Kistanova L.A., Repin S.V., Boldyrevsky P.B., Lakhvicky G.N. Mathematical and statistical fire incidence forecasting model for use in the EMERCOM system of Russia. *Modeling, optimization, and information technology*. 2022; 10-2(37). DOI: 10.26102/2310-6018/2022.37.2.002. EDN MIPRVJ. (rus).
8. Zobkov D.V., Prisyazhnyuk N.L., Tanygina A.A. Multifactory mathematical model of the dependence of the expected reduction of integrated damage from a number of preventive measures in the residential sector of Russia. *Technology of technosphere safety*. 2022; 3(97):100-118. DOI: 10.25257/TTS.2022.3.97.100-118. EDN DLRSG. (rus).
9. Satin A.P., Lakhvicky G.N. A promising algorithm for calculating and visualizing the magnitude of fire risks in a geoinformation system. *Proceedings of the international scientific and technical conference "Safety systems"*. 2024; 33-1:107-111. EDN BBGOJD. (rus).
10. *Fire risks. Dynamics, management, forecasting* / ed. by N.N. Brushlinsky, Yu.N. Shebeko. Moscow, FGU VNIPO, 2007; 370. (rus).
11. Brushlinsky N.N., Sokolov S.V., Klepko E.A., Belov V.A., Ivanova O.V., Popkov S.Yu. Fundamentals of the theory of fire risks and its applications : *monograph*. Moscow, Academy of State Fire Service of the EMERCOM, 2012; 192. (rus).
12. Brushlinsky N.N., Sokolov S.V., Grigor'eva M.P., Vagner P. How the fire statistics was created. *Fires and emergencies: prevention, elimination*. 2024; 69-77. DOI: 10.25257/FE.2024.1.69-77. EDN LGGRKF. (rus).
13. Goncharenko V.S., Chechetina T.A., Sibirko V.I., Nadochiy O.V., Polekhin P.V., Kozlov A.A. et al. Fires and fire safety in 2022. *Information and analytical collection*. Balashikha, FGBU VNIPO EMERCOM of Russia, 2023; 80. EDN IKFNVG. (rus).
14. Satin A.P., Lakhvicky G.N., Repin S.V., Voronin S.A. Assessment of integral fire risks in municipalities of the Nizhny Novgorod Region. *Modern problems of civil protection*. 2023; 2(47):38-45. EDN HRMZIE. (rus).
15. Zhilin O.I. A systematic approach to fire safety propaganda and training in the fire safety measures is the most important component of fire prevention activities. *Pozharovzryvobezopasnost'/Fire and explosion safety*. 2009; 18(8):33-37. EDN KWXHVV. (rus).
16. Kendrick D., Young B., Mason-Jones A.J., Ilyas N., Achana F.A., Cooper N.J. et al. Home safety education and provision of safety equipment for injury prevention. *Evidence-Based Child Health : A Cochrane Review Journal*. 2013; 8(3):761-939. DOI: 10.1002/ebch.1911
17. Golovin N.L. Education of a culture of life safety in the field of education, social advertising and fire prevention. *Pedagogical Journal*. 2020; 10(6-1):38-49. DOI: 10.34670/AR.2020.64.64.005. EDN ZCXYMM. (rus).
18. Runefors M., Johansson N., van Hees P. The effectiveness of specific fire prevention measures for different population groups. *Fire Safety Journal*. 2017; 91:1044-1050. DOI: 10.1016/j.firesaf.2017.03.064. EDN VDFVWV.
19. Makarova T.P., Baturo A.N., Shirinkin P.V. Approach to the using of sociological research in improving preventive activities in the fire safety field. *Technosphere safety*. 2020; 3(28):150-157. EDN MEASMG. (rus).
20. Al-Hajj S., Desapriya E., Pawliuk C., Garis L., Pike I. Interventions for Preventing Residential Fires in Vulnerable Neighbourhoods and Indigenous Communities : a Systematic Review of the Literature. *International Journal of Environmental Research and Public Health*. 2022; 19(9):5434. DOI: 10.3390/ijerph19095434. EDN FZACLD.
21. Hwang V., Duchossois G.P., Garcia-Espana J.F., Durbin D.R. Impact of a community based fire prevention intervention on fire safety knowledge and behavior in elementary school children. *Injury Prevention*. 2006; 12(5):344-346. DOI: 10.1136/ip.2005.011197
22. Frolov N.N., Bobin A.V., Lazovsky A.A., Komogortsev S.I., Sivokozov S.V. The role of preventive measures aimed at preventing death and injury to people in fires. *Problems of science*. 2022; 6(74):17-21. EDN EEEYWF. (rus).
23. Gielen A.C., Shields W., Frattaroli Sh., McDonald E., Jones V., Bishai D. et al. Enhancing fire department home visiting programs: Results of a community intervention trial. *Journal of Burn Care & Research*. 2013; 34(4):e250-e256. DOI: 10.1097/BCR.0b013e3182685b3a
24. Ashmarin V.V., Filippov Z.S., Filippova O.A. Preventive and organizational measures to prevent fires at work and at home. Technosphere processes: regional aspect : *Collection of materials of the V All-Russian scientific and practical conference, Cheboksary, March 25-26, 2022*. Cheboksary, Chuvash State University named after I.N. Ulyanov, 2022; 27-35. EDN MOCGBL. (rus).
25. Al-Hajj S., Thomas L., Morris Sh., Clare J., Jennings Ch., Biantoro Ch. et al. Community Fire Risk Reduction: Longitudinal Assessment for HomeSafe Fire Prevention Program in Canada. *International Journal of Environmental Research and Public Health*. 2023; 20(14):6369. DOI: 10.3390/ijerph20146369. EDN IZRVNR.
26. Duchossois G.P., Nance M.L., Garcia-Espana J.F., Flores J. Sustainability of an In-Home Fire Prevention Intervention. *Journal of Trauma Nursing*. 2009; 16(4):194-198. DOI: 10.1097/JTN.0b013e3181ca0876
27. Festag S. Analysis of the effectiveness of the smoke alarm obligation — Experiences from practice. *Fire Safety Journal*. 2021; 119:103263. DOI: 10.1016/j.firesaf.2020.103263. EDN SEMGQH.
28. Tannous W.K., Whybro M., Lewis C., Ollerenshaw M., Watson G., Broomhall S. et al. Using a cluster randomized controlled trial to determine the effects of intervention of battery and hardwired smoke alarms in New South Wales, Australia: Home fire safety checks pilot program. *Journal Safety Research*. 2016; 56:23-27. DOI: 10.1016/j.jsr.2015.11.001

29. Setien M.A., Han D., Zuniga G.C., Mier N., Lucio R.L., Treviño L. Does Injury Prevention Education Initiate Household Changes in a Spanish-Speaking Minority Population? *Journal of Community Heal.* 2014; 39(1):167-172. DOI: 10.1007/s10900-013-9755-0. EDN MDTMQO.
30. Sund B., Bonander C., Jakobsson N., Jaldell H. Do home fire and safety checks by on-duty firefighters decrease the number of fires? Quasi-experimental evidence from Southern Sweden. *Journal of Safety Research.* 2019; 70:39-47. DOI: 10.1016/j.jsr.2019.04.006
31. Tannous W.K., Agho K. Domestic fire emergency escape plans among the aged in NSW, Australia: The impact of a fire safety home visit program. *BMC Public Health.* 2019; 19(1):872. DOI: 10.1186/s12889-019-7227-x. EDN UHNJTE.
32. Joffe H., Perez-Fuentes G., Potts H.W.W., Rossetto T. How to increase earthquake and home fire preparedness: The fix-it intervention. *Natural Hazards.* 2016; 84(3):1943-1965. DOI: 10.1007/s11069-016-2528-1. EDN IVHBEN.
33. Pooley K., Nunez S., Whybro M. Evidence-based practices of effective fire safety education programming for children. *Australian Journal of Emergency Management.* 2021; 36(2):34-41. DOI: 10.47389/36.2.34
34. King W.J., Klassen T.P., LeBlanc J., Bernard-Bonnin A.-C., Robitaille Y., Pham B. et al. The Effectiveness of a Home Visit to Prevent Childhood Injury. *Pediatrics.* 2001; 108(2):382-388. DOI: 10.1542/peds.108.2.382
35. Lehna C., Merrell J., Furmanek S., Twyman S. Home fire safety intervention pilot with urban older adults living in Wales. *Burn. Journal of the International Society for Burn Injuries.* 2017; 43:69-75. DOI: 10.1016/j.burns.2016.06.025
36. Smith G.A., Kistamgari S., Splaingard M. Optimizing Smoke Alarm Signals for Those at Highest Risk for Residential Fire-Related Death: Testing the Effectiveness of Children's Smoke Alarms for Sleeping Older Adults. *Fire Technology.* 2021; 58:311-326. DOI: 10.1007/s10694-021-01147-5
37. Prus Yu.V., Chistyakova A.A., Rossinskaya K.G. Management of preventive activities at risk-based on a matrix representation of risks. *Technosphere safety.* 2019; 4(25):43-50. EDN XLVXHY. (rus).
38. Andreev Yu.A., Elfimova M.V., Mel'nik A.A., Shirinkin P.V., Baturo A.N. About the possible approach to the effectiveness's evaluating and the relevance of preventive measures in the field of fire safety. *Modern problems of civil protection.* 2018; 2(27):56-61. EDN XWXQBN. (rus).
39. Lakhvicky G.N. Analysis of the impact of preventive work on the dynamics of fire based on statistical data. *Siberian fire rescue bulletin.* 2023; 3(30):65-72. DOI: 10.34987/vestnik.sibpsa.2023.30.3.007. EDN JYHOSB. (rus).
40. Avdeenko A.M., Satin A.P., Nguen V.A. Features of selection of neural networks for assessing the effectiveness of preventive measures. *Technology of technosphere safety.* 2024; 3(105):55-68. DOI: 10.25257/TTS.2024.3.105.55-68. EDN UNVUHM. (rus).

Поступила 10.07.2025, после доработки 10.09.2025;

принята к публикации 20.09.2025

Received July 10, 2025; Received in revised form September 10, 2025;

Accepted September 20, 2025

Информация об авторе

ЛАХВИЦКИЙ Георгий Николаевич, адъюнкт кафедры информационных технологий, Академия Государственной противопожарной службы Министерства Российской Федерации по делам гражданской обороны, чрезвычайным ситуациям и ликвидации последствий стихийных бедствий, Россия, 129366, г. Москва, ул. Бориса Галушкина, 4; ORCID: 0000-0001-6762-9848; e-mail: egor70288@mail.ru

Information about the author

Georgy N. LAKHVITSKY, Adjunct of the Department of Information Technology, 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: 0000-0001-6762-9848; e-mail: egor70288@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 непереводаемых названий собственных имен, приборов и других объектов, имеющих собственные названия, а также непереводаемый сленг, известный только русскоговорящим специалистам. Это касается также аннотаций, авторских резюме и ключевых слов.

2.3. Информация об авторах.

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

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

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

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

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

2.3.3. ORCID, Researcher ID, Scopus Author ID.

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

В описании источников необходимо указывать всех авторов.

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

При составлении References необходимо следовать схеме:

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

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

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

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

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

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

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