

5-2022

FIRE and EXPLOSION
SAFETY

ПОЖАРОВЗРЫВО-

БЕЗОПАСНОСТЬ



НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКИЙ ЖУРНАЛ

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

КОМПЛЕКСНАЯ БЕЗОПАСНОСТЬ

пожарная • промышленная • производственная • экологическая

РАСЧЕТ ПРЕДЕЛОВ
ОГНЕСТОЙКОСТИ
СТРОИТЕЛЬНЫХ
КОНСТРУКЦИЙ ЗДАНИЯ
ТЕПЛОЭЛЕКТРОСТАНЦИИ





УЧРЕДИТЕЛЬ и ИЗДАТЕЛЬ —

ФГБОУ ВО «Национальный
исследовательский
Московский государственный
строительный университет»

Адрес:

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

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

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

Префикс DOI: 10.22227

РЕДАКЦИЯ:

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

Адрес редакции:

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

Адрес для переписки:

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

Тел./факс: +7 (495) 287-49-14
доб. 14-23

E-mail: info@fire-smi.ru

https://www.fire-smi.ru

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

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

Подписано в печать 26.10.2022.

Выход в свет 31.10.2022.

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.pxhere.com

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, Ньютаунбаби, Велико-
британия)

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

РЕДАКЦИОННАЯ КОЛЛЕГИЯ:

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

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

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

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

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

Бурханов А.И., д. ф.-м. н. (Волгоградский государственный технический универ-
ситет, Волгоград, Россия)

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

Холщевников В.В., д. т. н., профессор, академик и почетный член РАЕН, академик
ВАНКБ, заслуженный работник высшей школы Российской Федерации (Академия
Государственной противопожарной службы МЧС России, Москва, Россия)

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

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

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

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

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

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

СОДЕРЖАНИЕ

CONTENTS

НОВОСТИ, КОНФЕРЕНЦИИ, ВЫСТАВКИ

NEWS, CONFERENCES, EXHIBITIONS

Конференция «ПожСофт–2022», Россия,
г. Москва, 24–25 ноября 2022 г.

5

Conference “FireSoft–2022”, Russia,
Moscow, 24–25 November, 2022

ПРОЦЕССЫ ГОРЕНИЯ, ДЕТОНАЦИИ И ВЗРЫВА

COMBUSTION, DETONATION AND EXPLOSION PROCESSES

Н.Л. ПОЛЕТАЕВ
Влияние дисперсности частиц на динамику горения
алюминия в 1-м³ камере

6

N.L. POLETAEV
Particle size influence on the aluminum combustion
dynamics in 1-m³ chamber

БЕЗОПАСНОСТЬ ВЕЩЕСТВ И МАТЕРИАЛОВ

SAFETY OF SUBSTANCES AND MATERIALS

Е.В. ШИРЯЕВ, В.П. НАЗАРОВ
Снижение испарения углеводородных жидкостей
экранирующим слоем гранулированного пеностекла

14

E.V. SHIRYAEV, V.P. NAZAROV
Using the screening layer of granulated foam glass
to reduce the evaporation of hydrocarbon liquids

О.В. БЕЗЗАПОННАЯ
Изучение особенностей развития пожара с использованием
метода синхронного термического анализа

26

O.V. BEZZAPONNAYA
Using synchronous thermal analysis to study
characteristic features of a developing fire

БЕЗОПАСНОСТЬ ЗДАНИЙ, СООРУЖЕНИЙ, ОБЪЕКТОВ

SAFETY OF BUILDINGS, STRUCTURES, OBJECTS

С.В. ПУЗАЧ, Т.Ю. ЕРЕМИНА, Ф.А. ПОРТНОВ
Расчет пределов огнестойкости строительных
конструкций здания теплоэлектростанции

33

S.V. PUZACH, T.Yu. EREMINA, F.A. PORTNOV
Building structures of thermal power plants:
analysis of fire resistance limits

АВТОМАТИЗИРОВАННЫЕ СИСТЕМЫ И СРЕДСТВА

AUTOMATED SYSTEMS AND MEANS

Л.Т. ТАНКЛЕВСКИЙ, А.А. ТАРАНЦЕВ,
А.И. БОНДАР, И.Д. БАЛАБАНОВ
Особенности реализации автоматических установок
сдерживания пожара

43

L.T. TANKLEVSKIY, A.A. TARANTSEV, A.I. BONDAR,
I.D. BALABANOV
Aspects of implementation of automatic fire
containment systems

Ю.И. ГОРБАНЬ, С.Г. ЦАРИЧЕНКО
Роботизированные установки пожаротушения –
современные технологии пожаротушения
с российским приоритетом

54

Yu.I. GORBAN, S.G. TSARICHENKO
Robotic fire-fighting systems
using advanced fire suppression technologies
with Russian priority

СРЕДСТВА И СПОСОБЫ ТУШЕНИЯ ПОЖАРОВ

MEANS AND WAYS OF FIRE EXTINGUISHING

М.В. АЛЕШКОВ, В.П. МОЛЧАНОВ, С.А. МАКАРОВ,
Д.А. ИОЩЕНКО, А.В. ТРЕТЬЯКОВ,
В.В. БАРЕШКИН, Р.Б. БИТУЕВ
Применение воздушно-механической пены
для локализации и ликвидации пламенного горения
проливов сжиженного природного газа

67

M.V. ALESHKOV, V.P. MOLCHANOV, S.A. MAKAROV,
D.A. IOSCHENKO, A.V. TRETYAKOV,
V.V. BARESHKIN, R.B. BITUYEV
Using air-filled foam to contain and liquidate
the flaming combustion of liquefied natural
gas spills

ВОПРОС – ОТВЕТ

QUESTION – ANSWER

А.С. ХАРЛАМЕНКОВ
Системы защиты ячеек и батарейных блоков
с литий-ионными аккумуляторами. Часть 2

83

A.S. KHARLAMENKOV
Systems for protecting cells and batteries
with lithium-ion batteries. Part 2

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

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



Расчет пределов огнестойкости здания теплоэлектростанции

Стр. 33



Стр. 43

Реализация автоматических установок сдерживания пожара



Роботизированные установки пожаротушения

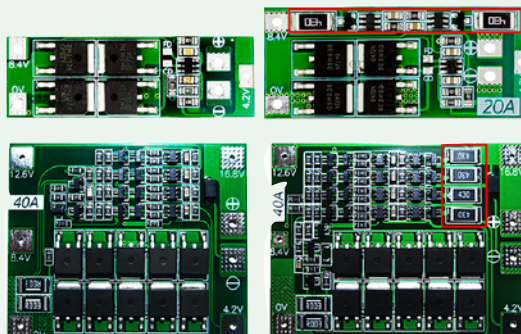
Стр. 54



Стр. 67

Применение пены для ликвидации горения сжиженного газа

Стр. 83



Системы защиты ячеек и батарейных блоков



FOUNDER and PUBLISHER —

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

Address:

26 Yaroslavskoe shosse, Moscow,
129337, Russia

Journal founded in 1992,
issued 6 times per year.

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

DOI prefix: 10.22227.

EDITORIAL STAFF:

Executive editor **Dyadicheva A.A.**

Editor **Korzukhina L.B.**

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

Corrector **Ermikhina O.V.**

Layout **Aleynikova A.G.**

Address of Editorial Staff:

26 Yaroslavskoe shosse, Moscow,
129337, Russia

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

Phone/Fax: +7 (495) 287-49-14
add. 14-23.

E-mail: info@fire-smi.ru

https://www.fire-smi.ru

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

No part of this publication may be used
or reproduced in any form or by any means
without the prior permission of the Publishers.
Reproducing any part of this material a reference
to the journal is obligatory.

Authors and advertisers account for contents
of given papers and for publishing in the open
press.

Opinion of Editorial Staff not always coincides with
Author's opinion.

Signed for printing 26.10.2022.

Date of publication 31.10.2022.

Format is 60 × 84 1/8.

Printing is 2000 copies.

Chalk-overlay mat paper.

Offset printing. Free price.

Journal sells subscription.

Printing house of the Publishing house
MISI – MGSU

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

EDITOR-IN-CHIEF:

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

DEPUTY EDITOR-IN-CHIEF:

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

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

EDITORIAL BOARD:

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

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

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

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

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

A.I. Burkhanov, Dr. Sci. (Phys.-Math.) (Volgograd State Technical University, Volgograd,
Russia)

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

V.V. Kholshchevnikov, Dr. Sci. (Eng.), Professor, Academician and Honoured Member
of Russian Academy of Natural Sciences, Academician of World Academy of Sciences for
Complex Safety, Honoured Higher Education Employee of the Russian Federation (State Fire
Academy of Emercom of Russia, Moscow, 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)

Ежегодная научно-практическая КОНФЕРЕНЦИЯ

24–25 ноября 2022 г.

Академия ГПС МЧС РФ, конференц-зал, Москва,
ул. Б. Голушкина, 4, стр. 2. ФОРМАТ: онлайн | офлайн



ПожСофт 2022

+7 (925) 908 59 88
conf.pozhsoft.ru

«ПожСофт–2022» — это ежегодная конференция для специалистов, использующих программное обеспечение для решения задач пожарной безопасности.



Для кого конференция

- 01** Разработчики программных продуктов в сфере пожарной безопасности.
- 02** Представители компаний, занимающихся обеспечением пожарной безопасности.
- 03** Специалисты по пожарной безопасности.
- 04** Студенты и преподаватели профильных ВУЗов.
- 05** Сотрудники МЧС.

В этом году мы расскажем о новой методике расчета пожарных рисков и представим ее авторов. Мы пригласим разработчиков софта для расчета времени эвакуации, огнестойкости, опасных факторов пожара, рисков, взрывов, противопожарных расстояний и обеспечим возможность задать им вопросы. Мы обсудим, с какими проблемами сталкиваются расчетчики и как они справляются с конкретными практическими задачами. Приглашенные представители экспертных и надзорных органов расскажут нам о том, как они оценивают расчеты и как принимают решение об их согласовании.

Для партнеров предоставляется возможность разместить рекламный стенд для демонстрации своих продуктов и услуг участникам конференции, студентам, курсантам и сотрудникам Академии ГПС МЧС России.



Наши спикеры

Приступюк Дмитрий Николаевич

к. т. н., начальник кафедры пожарной безопасности в строительстве Академии ГПС МЧС России

«Расчет огнестойкости строительных конструкций в условиях реальных воздействий при пожаре с помощью современных программных комплексов»

Дерюгин Дмитрий Павлович

заместитель директора АНО «ПожСофт»

«Актуальные проблемы практики выполнения и защиты расчетов пожарного риска в органах экспертизы»

Грачев Владимир Юрьевич

директор ООО «Ситис»

«Пиротек-Эвак — аналитическая модель и модель движения потоков людей для автоматической проверки выполнения требований безопасной эвакуации при информационном моделировании зданий и сооружений»

Карькин Илья Николаевич

к. ф. -м. н., директор «FireCat»

«Использование программного обеспечения Pyrosim и Pathfinder при анализе причин и расследовании пожаров» и др.

Вы также можете стать спикером

конференции! Подробности см. на сайте конференции.

Участникам конференции выдаются удостоверения о повышении квалификации от Академии Государственной противопожарной службы МЧС России.



Партнеры конференции



Влияние дисперсности частиц на динамику горения алюминия в 1-м³ камере

Николай Львович Полетаев ✉

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

АННОТАЦИЯ

Введение. Результаты стандартного исследования взрывоопасности аэрозвесей алюминия (АВА) могут способствовать развитию физики горения АВА. В частности, комплекс сведений о полидисперсности и значениях бедного предела турбулентного горения АВА в камере объемом $V = 1 \text{ м}^3$ позволил определить максимальный размер частиц взрывоопасной фракции полидисперсного образца $d_{m,t}^* \approx 40\text{--}50 \text{ мкм}$ (Полетаев, 2014). В настоящей работе устанавливается связь между динамикой горения АВА в 1-м³ камере и дисперсностью частиц. Дисперсность частиц образца описывается среднемассовым размером частиц его взрывоопасной фракции (d_{50}^*) в отличие от работ других исследователей, которые используют среднемассовый размер всех частиц (d_{50}).

Исходные данные. Использовались известные сведения о дисперсности и параметрах взрыва 15 образцов алюминия, исследованных в 1-м³ камере. Необходимые для расчета d_{50}^* , непрерывные функции распределения частиц по размерам представлялись распределениями Розина – Раммлера, заполняющими промежутки между дискретными данными ситового анализа образцов.

Динамика горения. Динамика турбулентного горения АВА в 1-м³ камере представлена максимальной скоростью выгорания аэрозвесей U_b . Расчет U_b производили по формуле (Китар, 1992), предназначенной для газовоздушных смесей, путем подстановки в эту формулу параметров взрыва АВА.

Результат работы и его обсуждение. Приведен график зависимости комплекса $d_{50}^* U_b$ от d_{50}^* . Усредненное значение комплекса ($\approx 33 \text{ мкм·м/с}$) постоянно в диапазоне $10 \leq d_{50}^* \leq 35 \text{ мкм}$. Последнее свойственно для произведения размера частиц на нормальную скорость ламинарного пламени в АВА (Ben Moussa, 2017) и говорит о подобии влияния дисперсности частиц на динамику турбулентного и ламинарного горения АВА.

Выводы. Дисперсность взрывоопасного полидисперсного образца алюминия определяется средним размером частиц взрывоопасной фракции образца d_{50}^* . Подobie закономерностей горения указывает на связь механизмов распространения ламинарного и турбулентного пламени в АВА.

Ключевые слова: пыль алюминия; взрывоопасная фракция; полидисперсность; турбулентность; ламинарное горение

Для цитирования: Полетаев Н.Л. Влияние дисперсности частиц на динамику горения алюминия в 1-м³ камере // Пожаровзрывобезопасность/Fire and Explosion Safety. 2022. Т. 31. № 5. С. 6–13. DOI: 10.22227/0869-7493.2022.31.05.6-13

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

Particle size influence on the aluminum combustion dynamics in 1-m³ chamber

Nikolay L. Poletaev ✉

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

ABSTRACT

Introduction. The results of a standard study of the explosibility of aluminum air suspensions (AAS) can contribute to the development of AAS combustion physics. In particular, a complex of information about the polydispersity and of the AAS low explosion limit values in a 1-m³ chamber made it possible to determine the maximum particle size of the explosive fraction of a polydisperse sample $d_{m,t}^* \approx 40\text{--}50 \text{ μm}$ (Poletaev, 2014). In the present work, a relationship is established between the AAS combustion dynamics in a 1-m³ chamber and particle dis-

person. The dispersity of sample particles is described by the mass-average particle size of its explosive fraction (d_{50}^*), in contrast to the works of other researchers who use the mass-average size of all particles (d_{50}).

Initial data. Known information about the dispersity and explosion parameters of 15 aluminum samples studied in a 1-m³ chamber was used. The continuous particle size distribution functions necessary for calculating d_{50}^* were represented by the Rosin – Rammler distributions filling the gaps between the discrete data of the sieve analysis of the samples.

Combustion dynamics. The dynamics of AAS turbulent combustion in a 1-m³ chamber is represented by the maximum air suspension burn-up rate U_b . U_b was calculated using the formula (Kumar, 1992) intended for gas-air mixtures by substituting the AAS explosion parameters into this formula.

Results and its discussion. A plot of the $d_{50}^* U_b$ complex versus d_{50}^* is shown. The average value of the complex ($\approx 33 \mu\text{m}\cdot\text{m/s}$) is constant in the range $10 \leq d_{50}^* \leq 35 \mu\text{m}$. The latter is typical for the product of the particle size and the normal velocity of the laminar flame in AAS (Ben Moussa, 2017) and indicates the similarity of the effect of particle dispersion on the dynamics of turbulent and laminar combustion of AAS.

Conclusions. The dispersion of an explosive polydisperse aluminum sample is determined by the average particle size of the explosive fraction of the sample d_{50}^* . The similarity of the combustion patterns indicates a relationship between the mechanisms of laminar and turbulent flame propagation in AAS.

Keywords: aluminum dust; explosive fraction; polydispersity; turbulence; laminar combustion

For citation: Poletaev N.L. Particle size influence on the aluminum combustion dynamics in 1-m³ chamber. *Pozharovzryvobezopasnost/Fire and Explosion Safety*. 2022; 31(5):6-13. DOI: 10.22227/0869-7493.2022.31.05.6-13 (rus).

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

Введение

Среди отраслей промышленности, подверженных воздействию пылевых взрывов, металлообрабатывающая отрасль является одной из наиболее часто поражаемых [1], что в значительной степени обусловлено взрывоопасными свойствами металлической пыли [2, 3]. К числу наиболее взрывоопасных металлических пылей справедливо относят мелкодисперсный алюминий.

Распространение турбулентного пламени по взрывополю алюминия (далее АВА) исследуется на протяжении многих десятилетий [3–6], что, однако, не привело ни к радикальному сокращению частоты возникновения взрывов АВА на производстве [7, 8], ни к ясному пониманию механизма горения АВА [4, 9]. Таким образом, дальнейшее изучение взрывоопасности АВА следует считать актуальным. К одному из направлений этой работы относится анализ опубликованных результатов стандартного исследования взрывоопасности АВА в камере объемом V , равным ≈ 20 л или, что предпочтительней ввиду более высокой надежности результатов, равным ≈ 1 м³.

Опубликованные результаты, как правило, содержат по каждой из исследованных АВА информацию о распределении частиц взвеси по размеру и трех показателях взрыва [3], имеющих практически значимость^{1, 2}. Это — нижний концентрационный предел распространения пламени (НКПР), максимальное избыточное давление взрыва $P_{\max}$ и индекс взрывоопасности K_{st} [3]. Последний представляет нормированную максимальную скорость нарастания давления взрыва $K_{st} = V^{1/3}(dP/dt)_{\max}$.

Пример успешного анализа сведений о дисперсном составе и значениях НКПР в 1-м³ камере для нескольких полидисперсных образцов алюминия демонстрируется в [10], где получена оценка максимального размера частиц, существенно влияющих на распространение турбулентного пламени по АВА. Этот размер частиц, который обозначим символами $d_{m,t}^*$, составил величину 40...50 мкм [10]. Данный размер частиц отделяет взрывоопасную фракцию пыли «частицы с размером не более $d_{m,t}^*$ » от фракции частиц с размером более $d_{m,t}^*$, неспособных к распространению пламени по АВА.

Разумно предположить, что анализ сведений о дисперсном составе и показателях $P_{\max}$ и K_{st} может привести к установлению количественной связи дисперсности частиц с динамикой турбулентного горения полидисперсного алюминия. Попытки подобных исследований встречались и ранее (см., например, [11–15]), но заканчивались неудачей, поскольку либо не обнаруживали упомянутой связи в явном виде, либо сводились к известному качественному результату [3]: $P_{\max}$ и K_{st} , как правило, снижаются с ростом среднемассового размера частиц d_{50} .

Неудачи упомянутых попыток связываем с некорректным использованием величины d_{50} в качестве эффективного размера частиц исследуемого полидисперсного образца горючего материала, даже в случаях учета индекса полидисперсности [14] и индекса асимметрии [15] этого распределения. Такой вывод основан на том, что на формирование величины d_{50} могут оказывать сильное влияние крупные частицы образца, не способные к актив-

¹ NFPA 68. Standard on Explosion Protection by Deflagration Venting, Current Edition: 2018.

² ГОСТ Р 12.3.047–2012 ССБТ. Пожарная безопасность технологических процессов. Общие требования. Методы контроля.

ному участию в горении аэровзвеси. Естественно предполагать, что усредненный показатель дисперсности образца относится к взрывоопасной фракции образца и, в первом приближении, представляет среднемассовый размер частиц этой фракции, который обозначим символами d_{50}^* .

В настоящей работе оценивается влияние дисперсности частиц, выраженной параметром d_{50}^* , на динамику горения алюминия в 1-м³ камере.

Исходные данные

Для решения поставленной задачи в настоящей работе использовали известные результаты (табл. 1) стандартного исследования взрывоопасности турбулентной АВА различного дисперсного состава в камере объемом 1 м³ [3, 16, 17]. Здесь 1 бар = 10⁵ кПа.

Моделирование используемых в дальнейшем непрерывных функций распределения частиц образцов по размерам $F(d)$ производили следующим образом. На отрезке оси d между соседними аргументами, для которых величина F известна по результатам ситового анализа, $F(d)$ представляется распределением Розина – Раммлера [18]:

$$F(d) = 1 - [1 - F(d_1)]^B,$$

где $B = (d/d_1)^{G_k}$;

G_k — крутизна функции распределения;

$$G_k = \frac{\ln\{\ln[1 - F(d_2)] / \ln[1 - F(d_1)]\}}{\ln(d_2/d_1)};$$

$F(d_1), F(d_2)$ — известные значения функции распределения на концах рассматриваемого отрезка d_1 и d_2 ;

индекс k принимает значение от 1 до 3, отвечающее порядковому номеру рассматриваемого отрезка оси d в следующем перечне отрезков: от 20 до 45 мкм, от 45 до 75 мкм, от 75 до 125 мкм.

На каждый из двух оставшихся участков оси d (область больших и область малых размеров частиц) распространяется функция распределения, построенная на смежном с ним отрезке. Расчетные значения параметра G_k приводятся в табл. 2.

На рис. 1 приводится геометрическое построение оценки d_{50}^* на примере образца АВА № 8. Значения d_{50}^* удовлетворяют соотношению $F(d_{50}^*) = 0,5F(d_{m,t}^*)$, где F — функция распределения размеров частиц рассматриваемого образца; $d_{m,t}^* = 50$ мкм.

Для демонстрации различия упоминавшихся выше средних размеров частиц полидисперсного образца на том же рисунке приводится геометричес-

Таблица 1. Исходные сведения о взрывоопасности АВА в 1-м³ камере

Table 1. Initial information about the explosiveness of АВА in a 1-m³ chamber

Номер образца Number sample	Значение F , % масс., по данным ситового анализа F value, % wt., according to sieve analysis				d_{50} , мкм d_{50} , μm	$P_{\max}$, бар $P_{\max}$, bar	$(dP/dt)_{\max}$, бар/с $(dP/dt)_{\max}$, bar/s	Источник сведений Data source
	20 мкм / 20 μm	32 мкм / 32 μm	71 мкм / 71 μm	125 мкм / 125 μm				
1	0,96	0,99	—	—	4,6	10	500	[17]
2	0,79	0,88	0,94	—	6	11,2	515	[3]
3	45	70	98	—	22	12,5	400	[3]
4	30	96	—	—	23	11	320	[3]
5	0,33	0,60	0,93	—	27	12,4	342	[16]
6	—	0,60	0,82	—	27	13	600	[16]
7	0,17	0,60	0,94	—	29	12,4	415	[16]
8	—	0,50	0,95	—	32	12,9	430	[16]
9	0,16	0,40	0,94	—	35	10	300	[17]
10	0,37	0,47	0,65	—	37	12,0	750	[16]
11	2	16	99	—	41	10,2	100	[3]
12	0,16	0,29	0,67	—	52	9,0	121	[16]
13	—	—	0,60	0,99	67	10	29	[16]
14	—	0,23	0,51	—	70	8,9	104	[16]
15	—	—	0,50	0,99	71	10,0	37	[16]

Таблица 2. Результаты обработки данных табл. 1

Table 2. Results of table 1 data processing

Номер образца Number sample	Значение G_k на k -диапазоне d , мкм G_k value on the k -range d , μm			d_{50}^* , мкм d_{50}^* , μm	U_b , м/с U_b , m/s
	$20 < d \leq 32$	$32 < d \leq 71$	$71 < d \leq 125$		
1	4,65	—	—	4,6	2,67
2	0,65	0,35	—	6	2,28
3	1,49	1,48	—	22	1,48
4	4,65	—	—	23	1,46
5	1,76	1,34	—	23	1,28
6	—	0,786	—	13	2,07
7	3,39	1,41	—	28	1,55
8	—	1,84	—	27	1,5
9	4,60	4,11	—	28	1,6
10	0,68	0,63	—	13	2,96
11	4,59	4,11	—	41	0,52
12	1,44	1,47	—	28	0,77
13	—	—	2,85	37	0,16
14	—	1,26	—	27	0,67
15	—	—	3,35	40	0,2

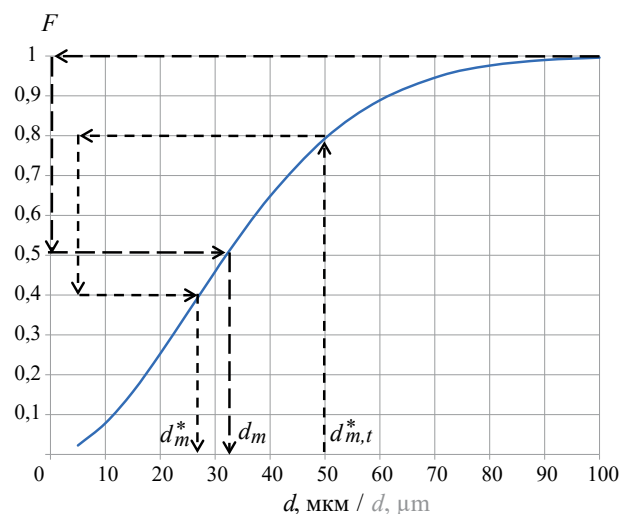


Рис. 1. Схемы оценки (пунктирные ломанные с длинным и коротким штрихом) медианного размера всех частиц ($d_{50} = 32$ мкм) и медианного размера частиц взрывоопасной фракции ($d_{50}^* = 27$ мкм) соответственно для образца алюминия № 8. Гладкая кривая — функция распределения частиц образца № 8 по размерам $F(d)$

Fig. 1. Estimation schemes (dashed broken lines with long and short stroke) of the median size of all particles ($d_{50} = 32$ μm) and the median size of explosive fraction particles ($d_{50}^* = 27$ μm), respectively, for aluminum sample No. 8. The smooth curve is the particle distribution function $F(d)$ for sample No. 8

кое построение параметра d_{50} , который, очевидно, должен превышать d_{50}^* .

Динамика горения пыли в 1-м³ камере

Методика проведения опыта с конкретным образцом пыли в сферической 1-м³ камере предусматривает следующие основные процедуры: создание турбулентной аэрозвеси при распылении навески исследуемой пыли в объеме камеры; воспламенение аэрозвеси в геометрическом центре камеры пиротехническим зарядом с энергией 10 кДж и регистрация изменения давления продуктов горения аэрозвеси P со временем t . Первичная информация о горении исследованного образца пыли складывается из набора осциллограмм $P(t)$, полученных для различных концентраций пыли (отношений массы навески пыли к объему камеры).

Динамику турбулентного горения исследованного образца пыли, по нашему мнению, разумно оценивать максимальным значением скорости выгорания, которую обозначим символами U_b . Физически U_b представляет скорость расширения радиуса сферы с объемом, равным текущему объему продуктов горения аэрозвеси, относи-

тельно свежей смеси. По аналогии с методами анализа горения газовоздушных смесей в сферических камерах U_b определяется выражением (см., например, [19]):

$$U_b = \frac{K_{st}}{\left\{ 4,84 P_{\max} (1 + P/P_0)^{1/\gamma} \left[1 - \frac{(1 - P/P_{\max})}{(1 + P/P_0)^{1/\gamma}} \right]^{2/3} \right\}}. \quad (1)$$

Здесь используется осциллограмма $P(t)$, отвечающая максимальному значению производной $(dP/dt)_{\max}$; P — значение избыточного давления продуктов горения (кПа) к моменту достижения производной dP/dt значения $(dP/dt)_{\max}$; $P_0 = 100$ кПа — начальное абсолютное давление воздуха во взрывной камере; γ — постоянная адиабаты для воздуха, $\gamma = 1,4$.

Согласно имеющимся немногочисленным сведениям об исследовании аэровзвесей в 1-м³ камере отношение $P/P_{\max}$ принадлежит интервалу значений $0,6 \pm 0,1$. В дальнейшем для АВА будем полагать $P/P_{\max} = 0,6$. Отклонение $P/P_{\max}$ от среднего значения в упомянутом интервале меняет оценку U_b не более чем на 10 %.

Отметим, что U_b характеризует динамику горения АВА к моменту времени, отвечающему повышенным параметрам состояния свежей аэровзвеси, подвергнутой сжатию продуктами горения (избыточному давлению ≈ 600 кПа и температуре ≈ 200 °С).

Представленные в табл. 1 результаты позволяют в соответствии с (1) получить значения U_b , которые приводятся в табл. 2.

Результат работы и его обсуждение

Для последующего изложения результата работы важно отметить, что $d_{m,t}^*$ близок к максимальному размеру частиц АВА, способных распространять ламинарное пламя. Действительно, нормальная скорость горения алюминия U_n , измеренная в маломасштабных опытах с узкими фракциями порошка, при размере частиц d порядка и более 10 мкм обратно пропорциональна d [9]:

$$d \cdot U_n(d) \approx 2,5 \text{ мкм} \cdot \text{м/с}. \quad (2)$$

По аналогии с горючими газовоздушными смесями разумно полагать, что U_n не опускается ниже 0,05 м/с [20]. Отсюда следует, что максимальный размер частиц АВА, способных распространять ламинарное пламя, равен $d_{m,t}^* \approx 50$ мкм.

Близость параметров $d_{m,t}^* \approx d_{m,l}^*$ порождает предположение о возможном сходстве других закономерностей турбулентного и ламинарного горения АВА, в частности о сходстве динамических характеристик

горения. Последнее означает возможность существования аналога соотношения (2) для зависимости динамики турбулентного горения АВА в 1-м³ камере от d_{50}^* .

В подтверждение реального существования такого аналога на рис. 2 приводится дискретный график зависимости комплекса $d_{50}^* U_b(d_{50}^*)$ от d_{50}^* . Несмотря на малочисленность и заметный разброс экспериментальных данных разумно предположить справедливость соотношения

$$d_{50}^* \cdot U_b(d_{50}^*) \approx 33 \text{ мкм} \cdot \text{м/с} \quad (3)$$

для диапазона размеров частиц от 10 до 30...35 мкм.

Подобие соотношений (2) и (3) может свидетельствовать об общности механизма распространения ламинарного и турбулентного пламени по аэровзвеси алюминия в отмеченном диапазоне размеров частиц.

Из-за малочисленности экспериментальных данных для $d < 10$ мкм не представляется возможным распространить упомянутое подобие на этот диапазон размеров частиц, для которого предложена на рис. 2 линейная аппроксимация предполагает постоянство скорости U_c . Косвенным подтверждением разумности такой аппроксимации является слабая зависимость времени горения частиц алюминия от их размера в диапазоне $d < 10$ мкм [9], которая с необходимостью должна приводить к слабой зависимости скорости горения АВА от размера частиц.

Повышенный фактор турбулизации аэровзвеси алюминия в 1-м³ камере ($U_b/U_n \approx 13$), который

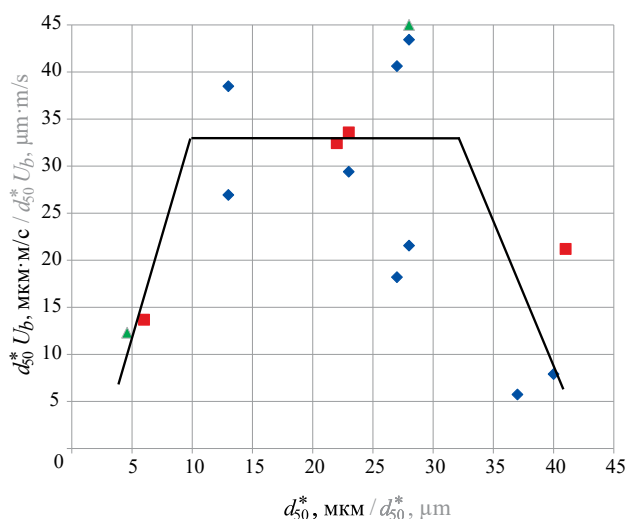


Рис. 2. Зависимость комплекса $d_{50}^* U_b$ от среднего размера взрывоопасных частиц d_{50}^* аэровзвеси алюминия. Ломаная линия — аппроксимация результата обработки дискретных экспериментальных данных: ■ — [3]; ♦ — [16]; ▲ — [17]

Fig. 2. Dependence of the complex $d_{50}^* U_b$ on the average size of aluminum air suspension explosive particles d_{50}^* . Broken line — approximation of the result of processing discrete experimental data: ■ — [3]; ♦ — [16]; ▲ — [17]

следует из указанных соотношений, объясняется, по-видимому, существенным увеличением U_b с ростом давления и температуры аэровзвеси.

Выводы

Исследовано влияние дисперсности частиц на динамику турбулентного горения алюминия в 1-м³ камере. Показано, что максимальная скорость

турбулентного выгорания аэровзвеси алюминия U_b в 1-м³ камере обратно пропорциональна среднему размеру d_{50}^* той фракции материала, которая содержит взрывоопасные частицы: $d_{50}^* U_b \approx 33$ мкм·м/с для значений d_{50}^* от 10...15 до 30...35 мкм.

Отмечено подобие этого влияния и зависимости скорости ламинарного горения аэровзвеси алюминия от размера частиц.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Yuan Z., Khakzad N., Khan F., Amyotte P. Dust explosions: A threat to the process industries // Process Safety and Environmental Protection. 2015. Vol. 98. Pp. 57–71. DOI: 10.1016/j.psep.2015.06.008
2. Marmo L., Riccio D., Danzi E. Explosibility of metallic waste dusts // Process Safety and Environmental Protection. 2017. Vol. 107. Pp. 69–80. DOI: 10.1016/j.psep.2017.01.011
3. Eckhoff R.K. Dust explosions in process the industries. 3rd ed. Gulf Professional Publishing/Elsevier, Boston, 2003. 720 p.
4. Julien P., Vickery J., Whiteley S., Wright A., Goroshin S., Berghorson J.M., Frost D.L. Effect of scale on freely propagating flames in aluminum dust clouds // Journal of Loss Prevention in the Process Industries, 2015. Vol. 36. Pp. 230–236. DOI: 10.1016/j.jlp.2014.12.022
5. Krietsch A., Reyes R.M., Kristen A., Kadoke D., Abbas Z., Krause U. Ignition temperatures and flame velocities of metallic nanomaterials // Journal of Loss Prevention in the Process Industries. 2021. Vol. 71. P. 104482. DOI: 10.1016/j.jlp.2021.104482
6. Zhang S., Bi M., Jiang H., Gao W. Synergistic inhibition of aluminum dust explosion by gas–solid inhibitors // Journal of Loss Prevention in the Process Industries. 2021. Vol. 71. P. 104511. DOI: 10.1016/j.jlp.2021.104511
7. Li G., Yang H.-X., Yuan C.-M., Eckhoff R.K. A catastrophic aluminium-alloy dust explosion in China // Journal of Loss Prevention in the Process Industries. 2016. Vol. 39. Pp. 121–130. DOI: 10.1016/j.jlp.2015.11.013
8. Taveau J., Hochgreb S., Lemkowitz S., Roekaerts D. Explosion hazards of aluminum finishing operations // Journal of Loss Prevention in the Process Industries. 2018. Vol. 51. Pp. 84–93. DOI: 10.1016/j.jlp.2017.11.011
9. Ben Moussa R., Proust C., Guessasma M., Saleh K., Fortin J. Physical mechanisms involved into the flame propagation process through aluminum dust-air clouds: A review // Journal of Loss Prevention in the Process Industries. 2017. Vol. 45. Pp. 9–28. DOI: 10.1016/j.jlp.2016.11.010
10. Полетаев Н.Л. Расчетно-экспериментальная оценка максимального размера частиц взрывоопасной монодисперсной аэровзвеси // Пожаровзрывобезопасность/Fire and Explosion Safety. 2014. Т. 23. № 9. С. 15–26. URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=22678225>
11. Santandrea A., Pacault S., Perrin L., Vignes A., Dufaud O. Nanopowders explosion: Influence of the dispersion characteristics // Journal of Loss Prevention in the Process Industries. 2019. Vol. 62. P. 103942. DOI: 10.1016/j.jlp.2019.103942
12. Wang Q., Fang X., Shu C.-M., Wang Q., Sheng Y., Jiang J., Sheng Z. Minimum ignition temperatures and explosion characteristics of micron-sized aluminium powder // Journal of Loss Prevention in the Process Industries. 2020. Vol. 64. P. 104076. DOI: 10.1016/j.jlp.2020.104076
13. Zhang J., Sun L., Sun T., Zhou H. Study on explosion risk of aluminum powder under different dispersions // Journal of Loss Prevention in the Process Industries. 2020. Vol. 64. P. 104042. DOI: 10.1016/j.jlp.2019.104042
14. Castellanos D., Carreto-Vazquez V.H., Mashuga C.V., Trotter R., Mejia A.F., Mannan M.S. The effect of particle size polydispersity on the explosibility characteristics of aluminium dust // Powder Technology. 2014. Vol. 254. Pp. 331–337. DOI: 10.1016/j.powtec.2013.11.028
15. Tascon A. Influence of particle size distribution skewness on dust explosibility // Powder Technology. 2018. Vol. 338. Pp. 438–445. DOI: 10.1016/j.powtec.2018.07.044
16. Scholl E.W., Reeh D., Wiemann W. et al. Brenn – und Explosions – Kenngrößen von Staeben // SFT-Report. No. 2. Pp. 2–79. 100 S.
17. Clouthier M.P., Taveau J.R., Dastidar A.G., Morrison L.S., Zalosh R.G., Ripley R.C. et al. Iron and aluminum powder explosibility in 20-L and 1-m³ chambers // Journal of Loss Prevention in the Process Industries. 2019. Vol. 62. P. 103927. DOI: 10.1016/j.jlp.2019.103927
18. Коузов П.А. Основы анализа дисперсного состава промышленных пылей и измельченных материалов. 3-е изд. Л. : Химия, 1987. 264 с.
19. Kumar R.K., Bowles E.M., Mintz K.J. Large-scale dust explosions experiments to determine the effects of scaling on explosion parameters // Combustion and Flame. 1992. Vol. 89. Pp. 320–332. DOI: 10.1016/0010-2180(92)90018-K
20. Zeldovich Ya.B., Barenblatt G.I., Librovich V.B., Makhviladze G.M. The mathematical theory of combustion and explosions // Consultants Bureau. New York, 1985. 600 p. DOI: 10.1007/978-1-4613-2349-5

REFERENCES

1. Yuan Z., Khakzad N., Khan F., Amyotte P. Dust explosions: A threat to the process industries. *Process Safety and Environmental Protection*. 2015; 98:57-71. DOI: 10.1016/j.psep.2015.06.008
2. Marmo L., Riccio D., Danzi E. Explosibility of metallic waste dusts. *Process Safety and Environmental Protection*. 2017; 107:69-80. DOI: 10.1016/j.psep.2017.01.011
3. Eckhoff R.K. *Dust explosions in the process industries*. 3rd ed. Gulf Professional Publishing/Elsevier, Boston, 2003; 720.
4. Julien P., Vickery J., Whiteley S., Wright A., Goroshin S., Berghthorson J.M., Frost D.L. Effect of scale on freely propagating flames in aluminum dust clouds. *Journal of Loss Prevention in the Process Industries*. 2015; 36:230-236. DOI: 10.1016/j.jlp.2014.12.022
5. Krietsch A., Reyes R.M., Kristen A., Kadoke D., Abbas Z., Krause U. Ignition temperatures and flame velocities of metallic nanomaterials. *Journal of Loss Prevention in the Process Industries*. 2021; 71:104482. DOI: 10.1016/j.jlp.2021.104482
6. Zhang S., Bi M., Jiang H., Gao W. Synergistic inhibition of aluminum dust explosion by gas-solid inhibitors. *Journal of Loss Prevention in the Process Industries*. 2021; 71:104511. DOI: 10.1016/j.jlp.2021.104511
7. Li G., Yang H.-X., Yuan C.-M., Eckhoff R.K. A catastrophic aluminium-alloy dust explosion in China. *Journal of Loss Prevention in the Process Industries*. 2016; 39:121-130. DOI: 10.1016/j.jlp.2015.11.013
8. Taveau J., Hochgreb S., Lemkowitz S., Roekaerts D. Explosion hazards of aluminum finishing operations. *Journal of Loss Prevention in the Process Industries*. 2018; 51:84-93. DOI: 10.1016/j.jlp.2017.11.011
9. Ben Moussa R., Proust C., Guessasma M., Saleh K., Fortin J. Physical mechanisms involved into the flame propagation process through aluminum dust-air clouds: A review. *Journal of Loss Prevention in the Process Industries*. 2017; 45:9-28. DOI: 10.1016/j.jlp.2016.11.010
10. Poletaev N.L. Experiment-calculated estimating of the maximum particle size of explosive monodisperse dust-air mixture. *Pozharovzryvobezopasnost/Fire and Explosion Safety*. 2014; 23(9):15-26. URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=22678225> (rus).
11. Santandrea A., Pacault S., Perrin L., Vignes A., Dufaud O. Nanopowders explosion: Influence of the dispersion characteristics. *Journal of Loss Prevention in the Process Industries*. 2019; 62:103942. DOI: 10.1016/j.jlp.2019.103942
12. Wang Q., Fang X., Shu C.-M., Wang Q., Sheng Y., Jiang J., Sheng Z. Minimum ignition temperatures and explosion characteristics of micron-sized aluminium powder. *Journal of Loss Prevention in the Process Industries*. 2020; 64:104076. DOI: 10.1016/j.jlp.2020.104076
13. Zhang J., Sun L., Sun T., Zhou H. Study on explosion risk of aluminum powder under different dispersions. *Journal of Loss Prevention in the Process Industries*. 2020; 64:104042. DOI: 10.1016/j.jlp.2019.104042
14. Castellanos D., Carreto-Vazquez V.H., Mashuga C.V., Trottier R., Mejia A.F., Mannan M.S. The effect of particle size polydispersity on the explosibility characteristics of aluminium dust. *Powder Technol.* 2014; 254:331-337. DOI: 10.1016/j.powtec.2013.11.028
15. Tascon A. Influence of particle size distribution skewness on dust explosibility. *Powder Technol.* 2018; 338:438-445. DOI: 10.1016/j.powtec.2018.07.044
16. Scholl E.W., Reeh D., Wiemann W. et al. Brenn – und Explosions – Kenngrößen von Stauben. *SFT-Report*. 2. 2-79:100. (ger).
17. Clouthier M.P., Taveau J.R., Dastidar A.G., Morrison L.S., Zalosh R.G., Ripley R.C. et al. Iron and aluminum powder explosibility in 20-L and 1-m³ chambers. *Journal of Loss Prevention in the Process Industries*. 2019; 62:103927. DOI: 10.1016/j.jlp.2019.103927
18. Kouzov P.A. *Fundamentals of the analysis of the disperse composition of industrial dusts and crushed materials*. 3th ed. Leningrad, Himiya Publ, 1987; 264.
19. Kumar R.K., Bowles E.M., Mintz K.J. Large-scale dust explosions experiments to determine the effects of scaling on explosion parameters. *Combustion and Flame*. 1992; 89:320-332. DOI: 10.1016/0010-2180(92)90018-K
20. Zeldovich I.A., Barenblatt G.I., Librovich V.B., Makhviladze G.M. *The mathematical theory of combustion and explosions*. Consultants Bureau. New York, 1985:600. DOI: 10.1007/978-1-4613-2349-5

Поступила 31.08.2022, после доработки 20.09.2022;

принята к публикации 29.09.2022

Received August 31, 2022; Received in revised form September 20, 2022;

Accepted September 29, 2022

Информация об авторе

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

Information about the author

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

Снижение испарения углеводородных жидкостей экранирующим слоем гранулированного пеностекла

Евгений Викторович Ширяев ✉, Владимир Петрович Назаров

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

АННОТАЦИЯ

Введение. Пожарная опасность открытой поверхности испарения углеводородных жидкостей при их хранении в емкостях (резервуарах), а также при аварийных проливах характеризуется массовой скоростью испарения. Основным способом снижения пожарной опасности углеводородных жидкостей является изоляция поверхности испарения углеводородных жидкостей с помощью различных покрытий, например понтов или плавающих крыш в емкостных аппаратах (резервуарах), а при аварийных проливах — применение воздушно-механической пены и т.п. Одним из эффективных способов снижения испарения углеводородных жидкостей является изоляция поверхности испарения легкими низкогигроскопичными гранулированными материалами, способными удерживаться на поверхности жидкости под действием архимедовой силы. Работа посвящена расчетно-экспериментальной оценке снижения массовой скорости испарения углеводородных жидкостей при экранировании поверхности пролива слоем гранулированного пеностекла.

Методика расчета и полученные результаты. Разработана математическая модель снижения скорости испарения углеводородных жидкостей через «сухой» слой гранулированного пеностекла, аналогом которой является закон Бугера – Ламберта – Бера. Разработана «Методика экспериментальной оценки массовой скорости испарения углеводородных жидкостей через экранирующий слой гранулированного пеностекла различной высоты» (Методика). Используя результаты экспериментального исследования параметров испарения легковоспламеняющихся жидкостей (ацетон, бензин АИ-92, гексан, этанол, керосин авиационный, дизельное топливо) через «сухой» слой гранулированного пеностекла марки «Термоизол» (фракции 5–7 мм) по разработанной Методике, были определены коэффициенты экранирования для ряда углеводородных жидкостей и осредненный коэффициент экранирования. Установлены зависимости скорости испарения жидкостей через различную толщину «сухого» слоя гранулированного пеностекла от давления насыщенных паров. Дана расчетно-экспериментальная оценка высоты зоны, ограниченной нижним концентрационным пределом распространения пламени паров при испарении исследуемых жидкостей со свободной поверхности и с экранирующим слоем гранулированного пеностекла марки «Термоизол».

Выводы. Разработанная математическая модель и Методика экспериментальной оценки массовой скорости испарения углеводородных жидкостей позволяет определять скорость испарения углеводородных жидкостей различных классов и может быть использована для исследования параметров испарения при экранировании различными по своему гранулометрическому составу материалами.

Ключевые слова: пористая среда; легковоспламеняющаяся жидкость; изолирующий слой; скорость испарения; коэффициент экранирования

Для цитирования: Ширяев Е.В., Назаров В.П. Снижение испарения углеводородных жидкостей экранирующим слоем гранулированного пеностекла // Пожаровзрывобезопасность/Fire and Explosion Safety. 2022. Т. 31. № 5. С. 14–25. DOI: 10.22227/0869-7493.2022.31.05.14-25

✉ Ширяев Евгений Викторович, e-mail: shiryayev@bk.ru

Using the screening layer of granulated foam glass to reduce the evaporation of hydrocarbon liquids

Evgeniy V. Shiryayev ✉, Vladimir P. Nazarov

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 open surface of evaporation of hydrocarbon liquids during their storage in tanks (reservoirs) and in case of emergency spills are the fire hazards characterized by the mass rate of evaporation. The main way

to reduce the fire hazard of hydrocarbon liquids is to isolate the evaporation surface of hydrocarbon liquids using various coatings, such as pontoons or floating roofs in tanks (reservoirs), and in case of emergency spills air-filled foam can be used, etc. An effective way to reduce the evaporation of hydrocarbon liquids is to isolate the evaporation surface using light slightly hygroscopic granular materials capable of being retained on the liquid surface by the Archimedean force. The authors address the analytical-experimental evaluation of a decrease in the mass rate of evaporation of hydrocarbon liquids when a layer of granulated foam glass shields the spill surface.

Calculation methodology and results. A mathematical model has been developed to describe a reduction in the evaporation rate of hydrocarbon liquids through a “dry” layer of granulated foam glass, similar to the Bouguer – Lambert – Beer law. A method of experimental evaluation of the mass evaporation rate of hydrocarbon liquids through a shielding layer of granulated foam glass of different height has been developed. Screening coefficients for a number of hydrocarbon liquids and the averaged screening coefficient were identified using the results of an experimental research into parameters of evaporation of flammable liquids (acetone, gasoline AI-92, hexane, ethanol, kerosene, diesel fuel) through a “dry” layer of granulated foam glass of the Termoizol brand (fraction 5–7 mm) obtained using the methodology developed by the authors. Dependences between the rates of liquid evaporation through different thicknesses of a “dry” layer of granulated foam glass on the pressure of saturated vapours have been established. The area height, limited by the bottom concentration limit of the vapour flame, spreading during the evaporation of tested liquids from the free surface that may also have a shielding layer of Termoizol granulated foam glass is estimated analytically and experimentally.

Conclusions. The developed mathematical model and the method of experimental estimation of the mass evaporation rate of hydrocarbon liquids allows to identify the evaporation rate of hydrocarbon liquids of different classes, and it can be used to study the parameters of evaporation shielded by materials having different granulometric compositions.

Keywords: porous medium; flammable liquid; insulating layer; evaporation rate; screening coefficient

For citation: Shiryayev E.V., Nazarov V.P. Using the screening layer of granulated foam glass to reduce the evaporation of hydrocarbon liquids. *Pozharovzryvbezopasnost/Fire and Explosion Safety*. 2022; 31(5):14-25. DOI: 10.22227/0869-7493.2022.31.05.14-25 (rus).

✉ Evgeniy Viktorovich Shiryayev, e-mail: shiryayev@bk.ru

Введение

Снижение испарения легких фракций углеводородных жидкостей является важной задачей в сферах экономической, экологической и пожарной безопасности. Борьба с потерями нефти и нефтепродуктов направлена на экономию топливно-энергетических ресурсов, играющих значимую роль в развитии экономики нефтедобывающих стран. По разным оценкам потери углеводородов в результате испарения нефти и нефтепродуктов в атмосферу Земли составляют от 20 до 100 млн т/год, при этом примерно 9 млн т углеводородов выпадает с осадками из атмосферы. С момента добычи до непосредственного использования нефтепродукты подвергаются более 20 переделкам, при этом 75 % потерь легких фракций углеводородов происходит в виде технологических испарений и 25 % при аварийных утечках, разливах [1–3]. С точки зрения пожарной опасности вероятность сценариев развития аварии, связанных с образованием избыточного давления при сгорании горючего паровоздушного облака, значительно выше, чем при мгновенном воспламенении, при этом поражающие факторы взрыва дистанционно превышают другие опасные факторы пожара¹.

Одним из эффективных способов снижения испарения углеводородных жидкостей является

изоляция поверхности испарения легкими низкогигроскопичными гранулированными материалами, способными удерживаться на поверхности жидкости под действием архимедовой силы. Анализ ряда гранулированных материалов (керамзит, вермикулит, перлит, шлакопемза, шунгизит и др.) показал, что пеностекло марки «Термоизол»² обладает сочетанием физических свойств, необходимых для устойчивой изоляции поверхности испарения углеводородных жидкостей: насыпная плотность фракции 5–7 мм (~180 кг/м³); теплопроводность (в сухом состоянии) 0,04–0,07 Вт/(м·К) ниже, чем у большинства углеводородных жидкостей; термостойкость (более 700 °С), водопоглощение (не более 8 %).

Процессы испарения и фильтрации углеводородных жидкостей и газов через гранулированные среды (грунт, песок, гравий и др.) широко рассматривались в работах отечественных и зарубежных авторов [4–13]. Влияние геометрических параметров гранулированной среды на снижение испарения углеводородных жидкостей исследовалось в работах [14–17].

В работе [16] гранулированное пеностекло предлагалось использовать в качестве покрытий зеркал резервуаров для сокращения потерь от испарения нефти и нефтепродуктов. Эмпирические данные указывают на то, что абсолют-

¹ Об утверждении методики определения расчетных величин пожарного риска на производственных объектах : утв. приказом МЧС России от 10 июля 2009 г. № 404 с изм. и доп. от 14 декабря 2010 г.

² ТУ 23.19.12-001-91978852-2018. Универсальный пористый материал термоизоляционный УПМ «Термоизол».

ные потери бензина в резервуарах с применением гранулированного пеностекла (размерами гранул 3...15 мм, при средней толщине слоя гранул 36 мм) сократились на 5 % (относительные на 14 %) по сравнению с потерями того же бензина на резервуарах с понтонами [15].

В данной работе рассмотрим процесс испарения углеводородных жидкостей через экранирующий слой гранулированного пеностекла (далее — СГП) марки «Термоизол» фракции 5–7 мм.

Целью исследования являлась оценка влияния экранирующего СГП на снижение параметров испарения углеводородных жидкостей. Для достижения поставленной цели решались две основные задачи: 1) построение математической модели испарения углеводородных жидкостей на основе коэффициента экранирования поверхности жидкости СГП; 2) проведение экспериментальной оценки параметров испарения углеводородных жидкостей через СГП и анализ полученных в ходе эксперимента данных.

Основным преимуществом гранулированного пеностекла перед большинством природных гравийных материалов является низкая насыпная плотность, благодаря которой часть СГП может оставаться «сухой» при всплытии объема гранул, например, в результате подъема уровня жидкости. Таким образом, образуется система: «СГП – жидкость», которую условно можно разделить на три зоны: 1) нижняя — гранулы, погруженные в жидкость; 2) средняя — гранулы, смоченные жидкостью; 3) верхняя — «сухие» гранулы, находящиеся выше границы разлива жидкости.

С увеличением общей высоты СГП растет высота «сухого» СГП, за счет этого увеличивается сопротивление потоку паров легких углеводородов и уменьшается высота зоны паров углеводородных жидкостей и, соответственно, масса паров. Схема экранирования СГП поверхности испарения углеводородных жидкостей представлена на рис. 1.

Высота смоченных жидкостью гранул одной фракции зависит от физических свойств жидкости и силы действия капиллярных сил, а высота «сухого» СГП и гранул, погруженных в жидкость, зависит от плотности жидкости, насыпной плотности гранул, пористости СГП и общей высоты СГП.

Математическая модель снижения скорости испарения углеводородных жидкостей через «сухой» СГП

Процесс испарения углеводородной жидкости через экранирующий «сухой» СГП можно рассмотреть с позиций квантовой теории света, проведя аналогию с законом Бугера – Ламберта – Бера, который определяет ослабление света с начальной интенсивностью I_0 при прохождении его через среду с показателем поглощения k и толщиной l :

$$I = I_0 \cdot \exp(-k \cdot l). \quad (1)$$

Снижение скорости испарения легковоспламеняющейся жидкости (ЛВЖ) v при прохождении пара через «сухой» СГП толщиной H_c , расположенный выше границы жидкости $H_{ж}$ с коэффициентом экранирования k_c , представлено на рис. 2.

Для построения математической модели испарения углеводородной жидкости через «сухой» СГП в системе «СГП – жидкость» запишем граничные условия:

- пористость СГП $m = \text{const}$, насыпная плотность СГП $\rho_{\text{СГП}} = \text{const}$;
- пористая среда корпускулярная, изотропная;
- диаметр частиц (гранул) d_r значительно меньше длины канала $l \gg d_r$;
- на границе раздела СГП, погруженного в углеводородную жидкость, и «сухого» СГП выполняются условия сохранения непрерывности давления и потока массы: $[p] = 0$; $[\rho \cdot v]$, где p — давление; ρ — плотность среды;

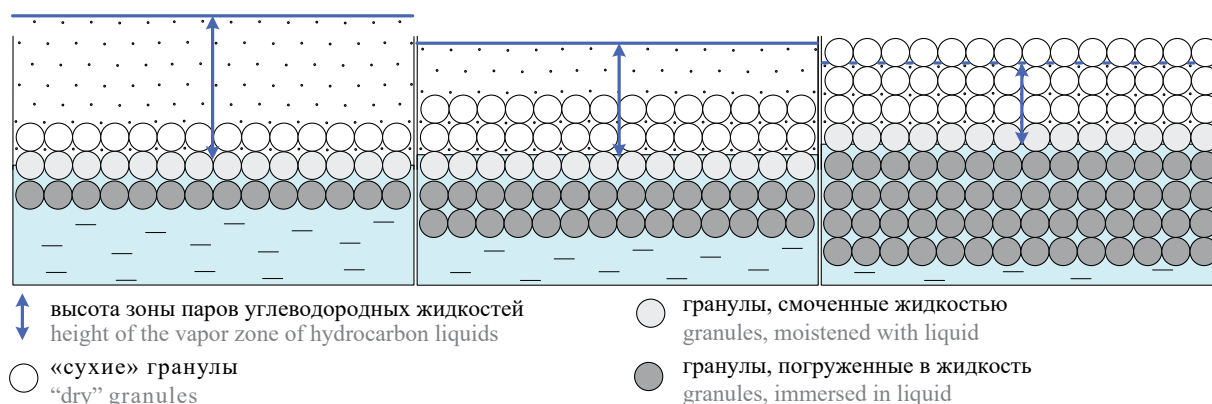


Рис. 1. Схема экранирования поверхности испарения углеводородных жидкостей СГП

Fig. 1. Shielding the surface of evaporation of hydrocarbon liquids by the layer of granulated foam glass (LGFG)

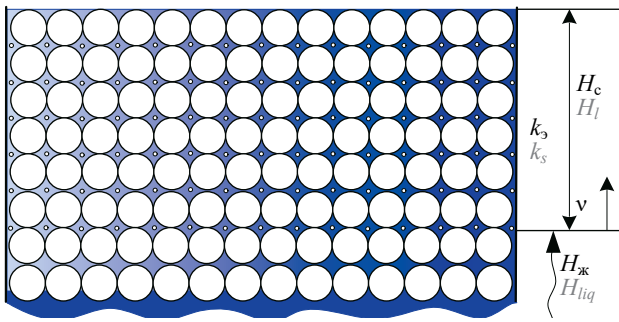


Рис. 2. Схема снижения скорости испарения ЛВЖ через «сухой» СГП

Fig. 2. Reducing the evaporation rate of highly flammable liquid using the “dry” LGFG

- граница раздела двух сред (жидкости и пара) в пористой среде является поверхностью разрыва, на которой условия сохранения потока массы и непрерывности давления: $[\rho(m \cdot w - v)] = 0$, где $[p] = 0$; где w — скорость поверхности разрыва по нормали к ней; v — скорость потока;
- на границе СГП в жидкости и «сухого» СГП в условиях капиллярного поднятия соблюдаются условия непрерывности давления и нормальной составляющей скорости: $[p] = 0$; $[v] = 0$;
- скорость испарения в пристеночной области $v_{пр}$ и на удалении к центральной оси горизонтальной проекции емкости: $v_{пр} = v = \text{const}$.

Изменение массовой скорости испарения жидкости зависит от длины участка канала и критерия (коэффициента) экранирования. Снижение скорости потока пара при прохождении через «сухой» СГП можно представить в виде:

$$\Delta v \sim -k_3 \cdot v \cdot \Delta l, \quad (2)$$

где k_3 — коэффициент экранирования;
 v — массовая скорость испарения жидкости, г/с;
 Δl — длина участка канала, м.

Массовую скорость испарения жидкости, пары которой прошли через гранулированный экранирующий слой пеностекла, представим в виде ∂v в точке с координатой x и толщиной (длиной канала) ∂x :

$$\partial v = -k_3 \cdot v \cdot \partial x. \quad (3)$$

Плотность потока молекул пара можно представить в виде:

$$j = \rho \cdot v_m \cdot S, \quad (4)$$

где ρ — плотность пара, кг/м³;
 v_m — скорость движения молекул пара, м/с;
 S — площадь поверхности испарения, м².

Интегрируя выражение (3), получим:

$$v(H_c) = v_0 \cdot \exp(-k_3 \cdot H_c), \quad (5)$$

где v_0 — массовая скорость испарения жидкости без экрана СГП, г/с.

Из выражения (5) следует:

$$\ln \left(\frac{v}{v_0} \right) = -k_3 H_c, \quad (6)$$

из выражения (6) можно выразить коэффициент экранирования:

$$k_3 = \frac{1}{H_c} \cdot \ln \left(\frac{v_0}{v} \right). \quad (7)$$

Методика экспериментальной оценки массовой скорости испарения углеводородных жидкостей через экранирующий слой гранулированного пеностекла

Основными критериями, позволяющими оценить пожарную опасность при проливе углеводородной жидкости или при испарении ее из открытых емкостей, являются: масса паров, скорость или интенсивность испарения. Для оценки эффективности экранирования СГП поверхности испарения углеводородных жидкостей применялся гравиметрический метод [18, 19], основанный на точном измерении убыли массы горючих паров.

Применяемые приборы, лабораторная посуда, горючие жидкости

Аналитические весы *GR-300* с ценой деления 0,0001 г, класс точности по ГОСТ OIML R 76-1-2011 — I, габаритные размеры 327 × 249 × 330 мм. Мерный цилиндр объемом 100 см³. Цилиндры (емкости) пропиленовые химически стойкие диаметром 115 мм, с толщиной стенки 2,0 мм. Высота стенок цилиндров соответствовала высоте гранулированных подложек с шагом 1,5 см. Гранулированное пеностекло марки «Термоизол» фракции 5–7 мм. Термоанемометр *TESTO 425* с разрешением 0,1 °C (± 0,5) и скоростью воздушного потока 0,01 м/с (± 0,03). Шприц стеклянный медицинский. Секундомер *TORRES SW-002* с точностью измерения 0,01 с. Исследования проводились на ЛВЖ различных классов: ацетон; гексан (ч); этиловый спирт (этанол); бензин АИ-92, керосин авиационный, дизельное топливо [20].

Условия проведения испытаний: температура воздуха 20,0 ± 0,1 °C; давление 99–102 кПа; относительная влажность воздуха 40–60 %.

Испытания проводились при начальной высоте «сухого» СГП H_c от 1,5 до 9 см с шагом 1,5. Подготовленные, взвешенные образцы СГП размещались в цилиндрах пропиленовых диаметром 115 мм, исследуемая жидкость наливалась через

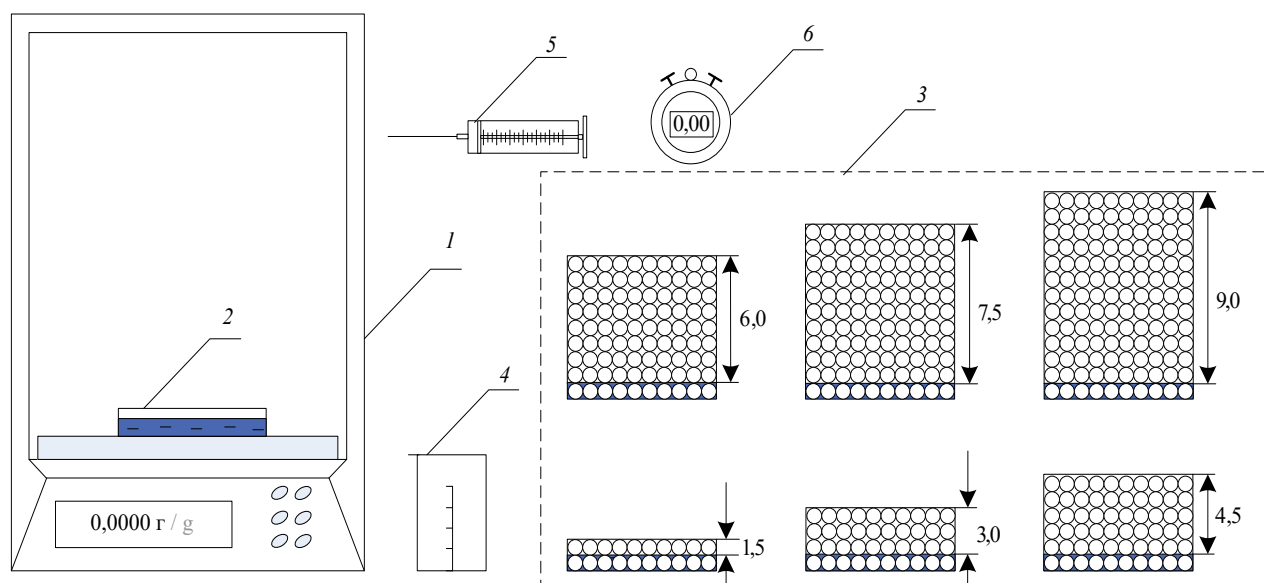


Рис. 3. Схема лабораторного оборудования: 1 — электронные весы; 2 — емкость с жидкостью; 3 — емкости с СГП и жидкостью; 4 — мерный стакан; 5 — шприц; 6 — секундомер

Fig. 3. Diagram of laboratory equipment: 1 — electronic scales; 2 — container with liquid; 3 — containers with LGFG and liquid; 4 — measuring cup; 5 — syringe; 6 — timer

шприц в центр емкости под слой СГП до уровня 10 мм от основания емкости, затем емкость устанавливалась на аналитические весы GR-300. Показания весов снимались через каждые 60 с в течение 900 с [20].

Такие условия проведения эксперимента обусловлены тем, что на начальном этапе (в первые минуты) скорость испарения жидкостей максимальна, и при отсутствии воздушного потока возможно образование взрывоопасных концентраций над поверхностью ЛВЖ с температурой вспышки ниже температуры воздуха. Схема лабораторного оборудования для исследования процесса испарения жидкостей представлена рис. 3.

Размещение на аналитических весах емкости с углеводородной жидкостью, покрытой экранирующим СГП, представлено на рис. 4.

Результаты эксперимента и их обсуждение

Осредненные значения массовой скорости испарения исследуемых ЛВЖ через экранирующий СГП сведены в табл. 1.

Обработка экспериментальных данных производилась с использованием методов математической статистики в соответствии с ГОСТ Р 8.736–2011. «Измерения прямые многократные. Методы обработки результатов измерений»³. Общая методическая погрешность результатов эксперимента не превышала 12 %. Графики зависимости массовой скорости испарения углеводородных



Рис. 4. Измерение убыли массы при испарении ацетона через СГП на аналитических весах

Fig. 4. Using analytical scales to measure the mass loss during acetone evaporation through the LGFG

³ ГОСТ Р 8.736–2011. Измерения прямые многократные. Методы обработки результатов измерений. Основные положения.

жидкостей от высоты «сухого» СГП представлены на рис. 5.

Экспериментальная оценка испарения углеводородных жидкостей при экранировании поверхности испарения «сухим» СГП показала снижение скорости испарения по экспоненциальной зависимости. Динамика снижения массовой скорости испарения углеводородных жидкостей с увеличением толщины «сухого» СГП выше у более летучих углеводородных жидкостей. По убыванию скоростного показателя испарения с указанием давления насыщенных паров при температуре воздуха, равной 20 °С, исследуемые жидкости выстроились в следующий ряд: бензин АИ-92 (25,56 кПа); ацетон (24,65 кПа); гексан (16,20 кПа); этанол (5,85 кПа); керосин авиационный (4,67 кПа); дизельное топливо (1,33 кПа). Анализ полученных данных позволил построить зависимости скорости испарения углеводородных жидкостей с экраном в виде СГП от давления насыщенных паров, рис. 6.

На основе осредненных значений массовой скорости испарения углеводородных жидкостей (см. табл. 1) определялся коэффициент экранирования k_3 по формуле (7), результаты расчета сведены в табл. 2.

Осредненный коэффициент экранирования k_3 для группы исследуемых углеводородных жидкостей $\sim 0,385$. При этом стоит отметить тот факт, что полученное значение близко к значению пористости фракции «Термоизол» (5–7 мм). Наиболее точно зависимость коэффициента экранирования от высоты «сухого» СГП описывается полиномиальной регрессией, уравнения регрессии коэф-

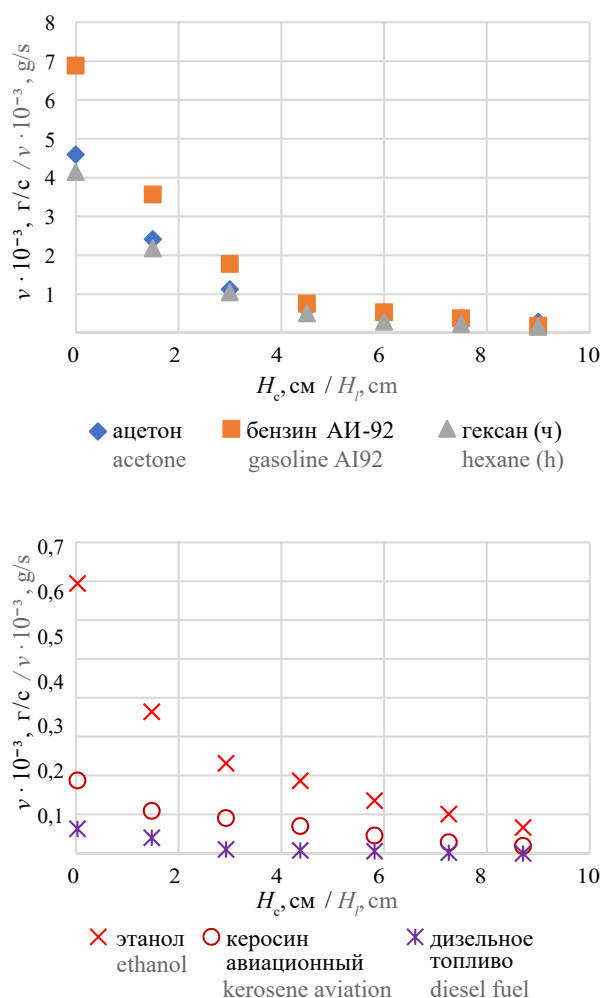


Рис. 5. Графики зависимости массовой скорости испарения углеводородных жидкостей от высоты «сухого» СГП

Fig. 5. Dependence diagrams of the mass evaporation rate of hydrocarbon liquids and the height of the “dry” LGFG

Таблица 1. Результаты осредненных значений массовой скорости испарения углеводородных жидкостей при различной высоте «сухого» СГП

Table 1. The averaged values of the mass evaporation rate of hydrocarbon liquids at different heights of the “dry” LGFG

Вещество Substance	Высота «сухого» слоя H_c , см Height of “dry” layer H_i , cm						
	0	1,5	3	4,5	6	7,5	9
	Средняя скорость испарения ЛВЖ $v \cdot 10^{-3}$, г/с The average evaporation rate of flammable liquids $v \cdot 10^{-3}$, g/c						
Ацетон Acetone	4,595	2,415	1,126	0,609	0,526	0,391	0,289
Бензин АИ-92 Gasoline AI92	6,883	3,566	1,778	0,759	0,534	0,380	0,284
Гексан Hexane	4,150	2,181	1,049	0,512	0,294	0,234	0,159
Этанол Ethanol	0,604	0,318	0,203	0,164	0,120	0,090	0,060
Керосин авиационный Aviation kerosene	0,165	0,097	0,081	0,063	0,042	0,027	0,019
Дизельное топливо Diesel fuel	0,057	0,037	0,011	0,009	0,007	0,004	0,002

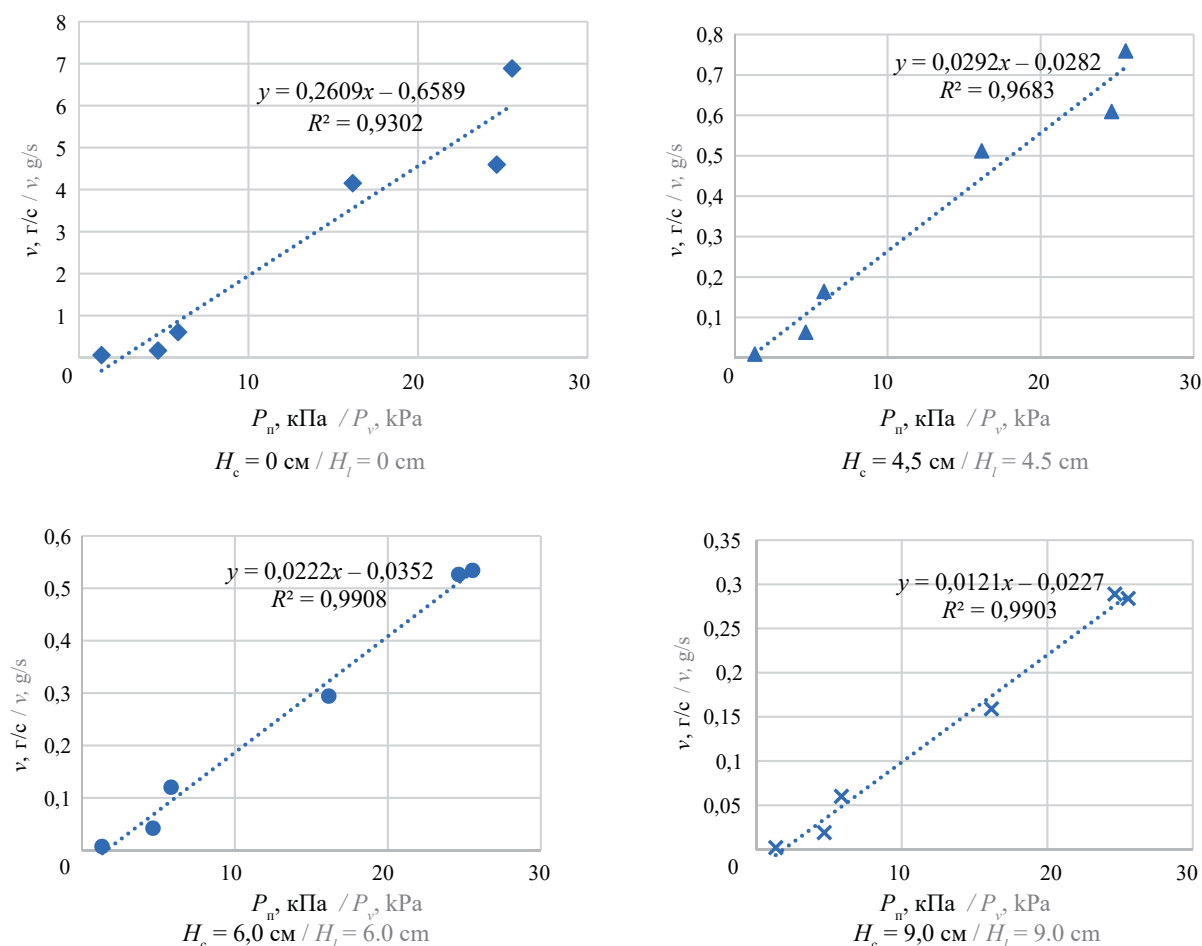


Рис. 6. Зависимости скорости испарения углеводородных жидкостей с экраном в виде СГП от давления насыщенных паров
Fig. 6. Dependences of the evaporation rate of hydrocarbon liquids, if the screen represents a LGFG, on the pressure of saturated vapours

фициентов экранирования с коэффициентом детерминации сведены в табл. 3.

Определив массовую скорость испарения жидкости без экрана СГП v_0 , этот же параметр v можно найти с учетом коэффициента экранирования k , по формуле (5). При этом, зная время испарения τ , нетрудно определить массу паров, испарившихся с поверхности жидкости через СГП m_n .

По результатам экспериментально полученной массы паров исследуемых ЛВЖ, испарившихся со свободной поверхности и при экранировании поверхности испарения СГП, определяли высоту зоны, ограничивающую область концентраций, превышающих нижний концентрационный предел распространения пламени (НКПР) при неподвижной воздушной среде $Z_{\text{НКПР}}$ по формуле⁴:

$$Z_{\text{НКПР}} = 0,26 \left(\frac{m_n}{\rho_n C_{\text{НКПР}}} \right)^{0,33}, \quad (8)$$

где m_n — масса ЛВЖ, поступившего в открытое пространство при пожароопасной ситуации, кг;
 $C_{\text{НКПР}}$ — НКПР паров ЛВЖ, % об. [21];
 ρ_n — плотность паров ЛВЖ при расчетной температуре и атмосферном давлении, кг/м³, определяемая по формуле:

$$\rho_n = \frac{M \cdot 273}{V_0 (273 + t_p)}, \quad (9)$$

где M — молекулярная масса кг/моль;
 V_0 — мольный объем, равный 22,4 м³/кмоль;
 t_p — расчетная температура, °С.

Зависимости высоты зоны $Z_{\text{НКПР}}$ от времени испарения τ исследуемых жидкостей со свободной поверхности и при экранировании поверхности испарения СГП различной высоты «сухого» слоя H_c представлены на рис. 7.

⁴ГОСТ Р 12.3.047.2012. Система стандартов безопасности труда (ССБТ). Пожарная безопасность технологических процессов. Общие требования. Методы контроля. М. : Стандартинформ, 2019. 62 с.

Таблица 2. Результаты расчета коэффициентов экранирования поверхности углеводородных жидкостей при различной высоте «сухого» СГП

Table 2. The calculation results of screening coefficients of the surface of hydrocarbon liquids for different heights of the “dry” LGFG

Вещество Substance	Высота «сухого» слоя H_c , см Height of the “dry” layer H_l , cm						Средний k'_s Average k'_s
	1,5	3,0	4,5	6,0	7,5	9,0	
	Коэффициенты экранирования «сухим» СГП k_s Screening coefficients using the LGFG k_s						
Ацетон Acetone	0,43	0,47	0,45	0,40	0,36	0,37	0,41 ± 0,02
Бензин АИ-92 Gasoline AI92	0,44	0,45	0,49	0,43	0,39	0,37	0,43 ± 0,02
Гексан Hexane	0,43	0,46	0,46	0,38	0,38	0,36	0,41 ± 0,02
Этанол Ethanol	0,43	0,36	0,29	0,27	0,25	0,26	0,31 ± 0,03
Керосин авиационный Aviation kerosene	0,60	0,45	0,35	0,27	0,32	0,31	0,38 ± 0,05
Дизельное топливо Diesel fuel	0,49	0,53	0,42	0,35	0,36	0,37	0,39 ± 0,03

Таблица 3. Уравнения полиномиальной регрессии коэффициентов экранирования «сухим» СГП поверхности испарения углеводородных жидкостей

Table 3. Polynomial regression equations of screening coefficients applied to the evaporation surface of hydrocarbon liquids using the LGFG

Вещество Substance	Уравнение полиномиальной регрессии Polynomial regression equation	R^2
Ацетон Acetone	$k_s = -0,0017 H_c^2 + 0,0046 H_c + 0,4448$ $k_s = -0,0017 H_l^2 + 0,0046 H_l + 0,4448$	0,72
Бензин АИ-92 Gasoline AI92	$k_s = -0,0021 H_c^2 + 0,0094 H_c + 0,4338$ $k_s = -0,0021 H_l^2 + 0,0094 H_l + 0,4338$	0,70
Гексан Hexane	$k_s = -0,0037 H_c^2 + 0,0273 H_c + 0,4097$ $k_s = -0,0037 H_l^2 + 0,0273 H_l + 0,4097$	0,81
Этанол Ethanol	$k_s = -0,0045 H_c^2 + 0,0698 H_c + 0,5246$ $k_s = -0,0045 H_l^2 + 0,0698 H_l + 0,5246$	0,99
Керосин авиационный Aviation kerosene	$k_s = -0,0103 H_c^2 + 0,1446 H_c + 0,7900$ $k_s = -0,0103 H_l^2 + 0,1446 H_l + 0,7900$	0,97
Дизельное топливо Diesel fuel	$k_s = -0,0027 H_c^2 + 0,0507 H_c + 0,5949$ $k_s = -0,0027 H_l^2 + 0,0507 H_l + 0,5949$	0,74

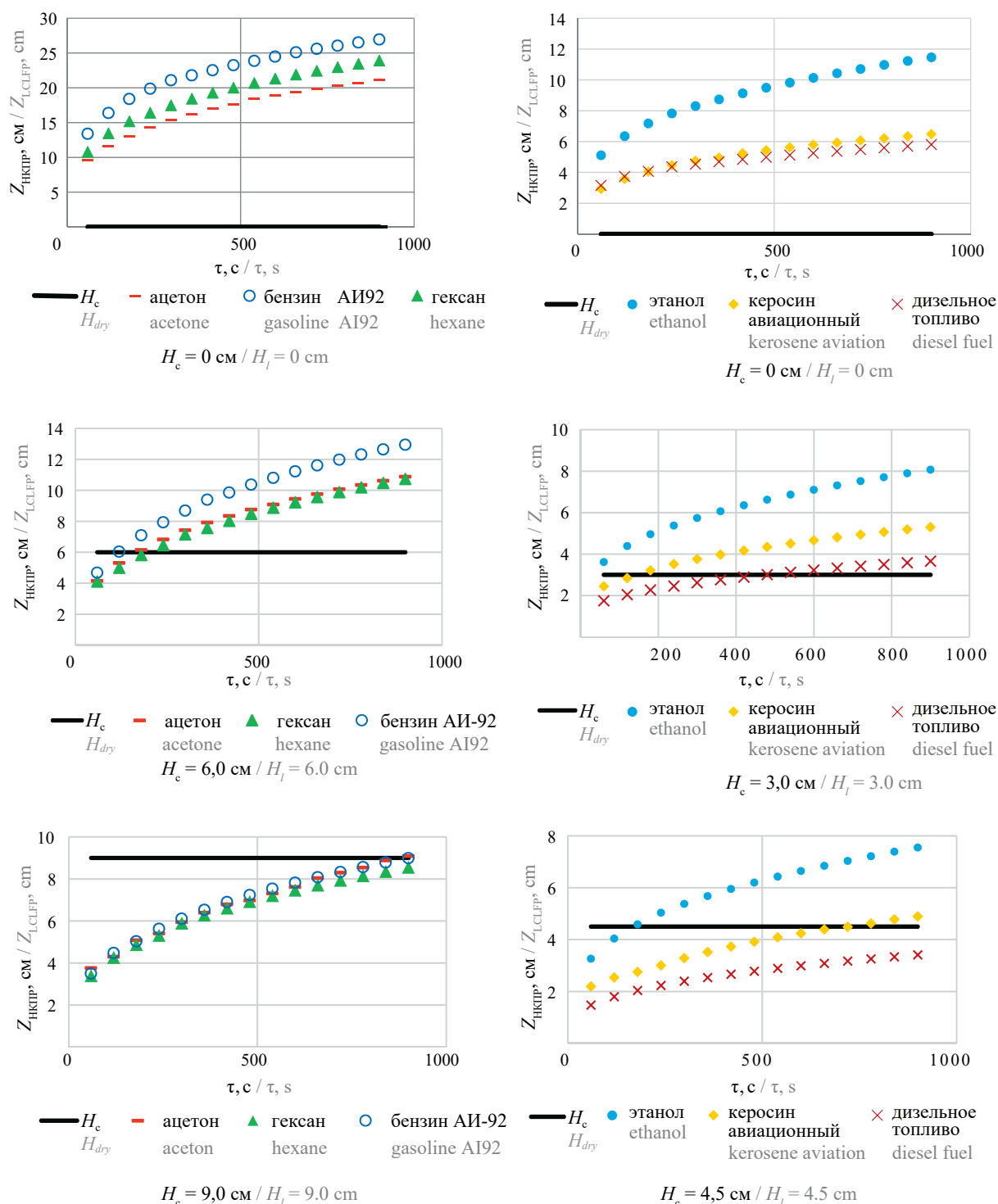


Рис. 7. Графики зависимости высоты зоны $Z_{\text{НКПР}}$ от времени испарения τ ЛВЖ со свободной поверхности и при экранировании СГП

Fig. 7. Diagrams showing dependence between the height of zone $Z_{\text{ЛСЛФР}}$ on evaporation time τ of flammable liquid evaporated from the free surface and if shielded using the "dry" LGFG

На графиках рис. 7 видно, что характер изменения высоты зоны $Z_{\text{НКПР}}$ соответствует схеме экранирования поверхности испарения углеводородных жидкостей СГП, представленной на рис. 1. С увеличением толщины «сухого» СГП высота зоны паров

$Z_{\text{НКПР}}$ у исследуемых жидкостей заметно снижается. Для слаболетучих ЛВЖ (с низким значением давления насыщенных паров) динамика роста параметра $Z_{\text{НКПР}}$ ниже и соблюдается условие $Z_{\text{НКПР}} < H_c$ при значительно меньших H_c .

Выводы

Проведенные исследования позволили обосновать эффективность снижения критериев пожарной опасности при испарении ряда углеводородных жидкостей в условиях экранирования поверхности испарения слоем гранулированного пеностекла марки «Термоизол». Достоверность полученных данных основывается на апробированных методах лабораторных испытаний и статистического анализа.

На основе полученных зависимостей массовой скорости испарения от давления насыщенных

паров ЛВЖ, а также предложенной математической модели снижения скорости испарения углеводородных жидкостей через «сухой» СГП можно оценивать критерии пожарной опасности при испарении углеводородных жидкостей различных классов.

Разработанная Методика экспериментальной оценки массовой скорости испарения углеводородных жидкостей через СГП может быть использована для исследования параметров испарения при экранировании различными по своему гранулометрическому составу материалами.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Данилов В.Ф., Шурыгин В.Ю. К вопросу о решении проблемы потерь нефтепродуктов от испарения // Успехи современного естествознания. 2016. № 3. С. 141–145. URL: <https://natural-sciences.ru/ru/article/view?id=35840>
2. Цегельский В.Г., Ермаков П.Н., Спиридонов В.С. Защита атмосферы от выбросов углеводородов из резервуаров для хранения и транспортирования нефти и нефтепродуктов // Безопасность жизнедеятельности. 2001. № 3. С. 16–18.
3. Сулейманов Ф.Р., Маркова Л.М. Потери нефти и нефтепродуктов при эксплуатации резервуарных парков // Нефтегазовый терминал: вып. 8 : сб. науч.-тех. ст. Междунар. науч.-тех. конф. «Транспорт и хранение углеводородного сырья» / под. общ. ред. С.Ю. Подорожникова. Тюмень : ТюмГНГУ, 2015. С. 178–182. URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=25508382>
4. Лейбензон Л.С. Движение природных жидкостей и газов в пористой среде. М.-Л. : Гостехиздат, 1947. 244 с.
5. Баренблатт Г.И., Ентов В.М., Рыжик В.М. Теория нестационарной фильтрации жидкости и газа. М. : Недра, 1972. 288 с.
6. Bear J. Dynamics of fluids in porous media. N-Y, London, Amsterdam : American Elsevier Publ. Comp., 1972. 764 p.
7. Dullien F.A.L. Porous media fluid transport and pore structure. London : Academic Press. 1979. 396 p.
8. Firoozabadi A., Katz D.L. An analysis of high-velocity gas flow through porous media // Journal of Petroleum Technology. 1979. Vol. 31. Issue 02. Pp. 211–216. DOI: 10.2118/6827-PA
9. Handbook of porous media / Taylor & Francis Group, LLC / ed. by Kambiz Vafai. 2nd ed. CRC Press, 2005. 744 p. DOI: 10.1201/9780415876384
10. Chen Z., Huan G., Ma Y. Computational methods for multiphase flows in porous media Siam. Dallas, Texas : Southern Methodist University, 2006. 569 p.
11. Леонтьев Н.Е. Основы теории фильтрации. М. : МГУ. 2009. 87 с.
12. Kantzas A., Bryan J., Taheri S. Fundamentals of fluid flow in porous media // PERM Inc. 2016. URL: <http://perminc.com/resources/fundamentals-of-fluid-flow-in-porous-media> (дата обращения: 15.10.2021).
13. Cejas M.C., Hough L.A., Frétigny C., Dreyfus R. Effect of granular packing geometry on evaporation // Soft Matter. 2018. Vol. 14. Issue 34. Pp. 6994–7002. DOI: 10.1039/C8SM01179F URL: <https://arxiv.org/pdf/1601.04584v2.pdf> (дата обращения: 15.10.2021).
14. Ширяев Е.В. Исследование параметров подложки гранулированного пеностекла, влияющих на снижение интенсивности испарения горючих жидкостей // Современные проблемы гражданской защиты. 2019. № 4. С. 19–27. URL: <http://ntp.edufire37.ru/wp-content/uploads/2018/12/№3-2018-готово.pdf> (дата обращения: 15.10.2021).
15. Шацких Е.С., Левин С.Н., Писаревский В.М. Применение гранулированного пеностекла в качестве покрытия зеркала испарения нефтяных резервуаров // Транспорт и хранение нефтепродуктов и углеводородного сырья. 2018. № 4. С. 17–21. DOI: 10.24411/0131-4270-2018-10403
16. Ширяев Е.В., Рубцов Д.Н., Назаров В.П., Булгаков В.В. Огнезащитный эффект гранулированной пеностекольной подложки при углеводородном пожаре пролива // Безопасность жизнедеятельности. 2016. № 4. С. 33–37.
17. Dadashov I. Experimental investigation of using granulated foamglass for cooling the combustible liquid // Fire Safety. 2018. Issue 33. Pp. 48–52. DOI: 10.32447/20786662.33.2018.06
18. Алексеев В.Н. Количественный анализ / под ред. д-ра хим. наук П.К. Агасяна 5-е изд. М. : Альянс. 2013. 504 с.
19. Skoog D., West D.M., Holler F.J. Gravimetric analysis // Fundamentals of Analytical Chemistry. 1996. Vol. 7. Pp. 71–96.
20. Ширяев Е.В. Снижение пожарной опасности локальных проливов углеводородных жидкостей на основе применения гранулированного пеностекла : дис. ... канд. техн. наук. М., 2021. 183 с.

21. Корольченко А.Я., Корольченко Д.А. Пожаро-взрывоопасность веществ и материалов и сред-

ства их тушения : справочное издание. М. : Пож-наука, 2004. Т. 1–2.

REFERENCES

1. Danilov V.F., Shirygin V.Y. To the question about ways to solve the problem of evaporation loss of oil products. *Advances in Current Natural Sciences*. 2016; 3:141-145. URL: <https://natural-sciences.ru/en/article/view?id=35840> (rus).
2. Tsegelsky V.G., Ermakov P.N., Spiridonov V.S. Protection of the atmosphere from hydrocarbon emissions from reservoirs for storage and transportation of oil and petroleum products. *Life safety*. 2001; 3:16-18. (rus).
3. Suleymanov F.R., Markova L.M. Losses of oil and petroleum products during the operation of tank farms. *Oil and Gas Terminal: Issue 8 : collection of scientific articles of the International Scientific and Technical Conference "Transportation and storage of hydrocarbon raw materials"*. S.Y. Podorozhnikov (Ed.). Tyumen, TSOGU, 2015; 178-182. URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=25508382> (rus).
4. Leibenzon L.S. Movement of natural liquids and gases in a porous medium. Moscow-Leningrad, Gostekhizdat Publ., 1947; 244. (rus).
5. Barenblatt G.I., Entov V.M., Ryzhik V.M. The theory of unsteady filtration of liquid and gas. Moscow, Nedra Publ., 1972; 288. (rus).
6. Bear J. Dynamics of fluids in porous media. N-Y, London, Amsterdam, American Elsevier Publ. Comp., 1972; 764.
7. Dullien F.A.L. *Porous media fluid transport and pore structure*. London, Academic Press, 1979; 396.
8. Firoozabadi A., Katz D.L. An analysis of high-velocity gas flow through porous media. *Journal of Petroleum Technology*. 1979; 31(02):211-216. DOI: 10.2118/6827-PA
9. *Handbook of porous media*. Kambiz Vafai (ed.). 2nd ed. CRC Press, 2005; 744. DOI: 10.1201/9780415876384
10. Chen Z., Huan G., Ma Y. *Computational methods for multiphase flows in porous media Siam*. Texas, Dallas, Southern Methodist University, 2006; 569.
11. Leontiev N.E. *Fundamentals of filtration theory*. Moscow, Moscow State University, 2009; 87. (rus).
12. Kantzas A., Bryan J., Taheri S. *Fundamentals of fluid flow in porous media*. PERM Inc. 2016. URL: <http://perm-inc.com/resources/fundamentals-of-fluid-flow-in-porous-media> (accessed July 15, 2022).
13. Cejas M.C., Hough L.A., Frétigny C., Dreyfus R. Effect of granular packing geometry on evaporation. *Matter*. 2018; 14(34):6994-7002. DOI: 10.1039/C8SM01179F URL: <https://arxiv.org/pdf/1601.04584v2.pdf> (accessed July 15, 2022).
14. Shiryayev E.V. Research of substrate parameters granulated foam glass influencing the evaporation of flammable liquids. *Modern Problems of Civil Protection*. 2019; 4:19-27. URL: <http://ntp.edufire37.ru/wp-content/uploads/2018/12/№3-2018-ready.pdf> (accessed 10/15/2021). (rus).
15. Shatskikh E.S., Levin S.N., Pisarevsky V.M. Application of granulated foam glass as a coating of the evaporation mirror of oil tanks. *Transport and Storage of Oil Products and Hydrocarbons*. 2018; 4: 17-21. DOI: 10.24411/0131-4270-2018-10403 (rus).
16. Shiryayev E.V., Rubtsov D.N., Nazarov V.P., Bulgakov V.V. The fire retardant effect of granulated foam glass substrate with the hydrocarbon fire spills. *Life safety*. 2016; 4:33-37. (rus).
17. Dadashov I. Experimental investigation of using granulated foamglass for cooling the combustible liquid. *Fire Safety*. 2018; 48-52. DOI:10.32447/20786662.33.2018.06
18. Alekseev V.N. *Quantitative analysis*. P.K. Aghasyan (Ed.). 5th ed. Moscow, Alliance Publ., 2013; 504. (rus).
19. Skoog D., West D.M., Holler F.J. Gravimetric analysis. *Fundamentals of Analytical Chemistry*. 1996; 7:71-96.
20. Shiryayev E.V. *Reduction of fire danger of local spills of hydrocarbon liquids based on the use of granular foam glass : dis. ... candidate of Technical Sciences*. Moscow, 2021; 183. (rus).
21. Korolchenko A.Ya., Korolchenko D.A. Fire and explosion hazard of substances and materials and means of extinguishing them: a reference edition. Moscow, PozhNauka Publ., 2004; 1-2. (rus).

Поступила 31.07.2022, после доработки 12.09.2022;
принята к публикации 15.09.2022

Received July 31, 2022; Received in revised form September 12, 2022;

Accepted September 15, 2022

Информация об авторах

ШИРЯЕВ Евгений Викторович, канд. техн. наук, старший преподаватель кафедры пожарной безопасности технологических процессов в составе Учебно-научного комплекса пожарной безопасности объектов защиты, Академия Государственной противопожарной службы Министерства Российской Федерации по делам гражданской обороны, чрезвычайным ситуациям и ликвидации последствий стихийных бедствий, Россия, 129366, г. Москва, ул. Бориса Галушкина, 4; РИНЦ ID: 759806; ORCID: 0000-0002-5845-7308; e-mail: shiryaev@bk.ru

НАЗАРОВ Владимир Петрович, д-р техн. наук, профессор, профессор кафедры пожарной безопасности технологических процессов в составе Учебно-научного комплекса пожарной безопасности объектов защиты, Академия Государственной противопожарной службы Министерства Российской Федерации по делам гражданской обороны, чрезвычайным ситуациям и ликвидации последствий стихийных бедствий, Россия, 129366, г. Москва, ул. Бориса Галушкина, 4; РИНЦ ID: 764644; ORCID: 0000-0002-7164-583X; e-mail: nazarovvp@bk.ru

Вклад авторов:

Ширяев Е.В. — концепция исследования; методика проведения эксперимента; обработка экспериментальных данных; написание исходного текста; итоговые выводы.

Назаров В.П. — научное руководство; итоговые выводы; научное редактирование текста.

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Information about the authors

Evgeniy V. SHIRYAEV, Cand. Sci. (Eng.), Senior Lecturer of the Department of Fire Safety of Technological Processes as part of the Educational and Scientific Complex of Fire Safety of Protection Objects, the State Fire Academy of the Ministry of Russian Federation for Civil Defense, Emergencies and Elimination on Consequences of Natural Disasters, Borisa Galushkina St., 4, Moscow, 129366, Russian Federation; ID RISC: 759806; ORCID: 0000-0002-5845-7308; e-mail: shiryaev@bk.ru

Vladimir P. NAZAROV, Dr. Sci. (Eng.), Professor, Professor of the Department of Fire Safety of Technological Processes as part of the Educational and Scientific Complex of Fire Safety of Protection Objects, the State Fire Academy of the Ministry of Russian Federation for Civil Defense, Emergencies and Elimination on Consequences of Natural Disasters, Borisa Galushkina St., 4, Moscow, 129366, Russian Federation; ID RISC: 764644; ORCID: 0000-0001-8579-4062; e-mail: nazarovvp@bk.ru

Contribution of the authors:

Evgeniy V. Shiryaev — the concept of the study; methodology for conducting the experiment; processing of experimental data; writing the original text; final conclusions.

Vladimir P. Nazarov — scientific guidance; final conclusions; scientific text editing.

The authors declare no conflicts of interests.

Изучение особенностей развития пожара с использованием метода синхронного термического анализа

Оксана Владимировна Беззапонная ✉

Уральский институт Государственной противопожарной службы МЧС России, г. Екатеринбург, Россия

АННОТАЦИЯ

Введение. Целью работы является оценка температуры воздействия на исследуемый материал по результатам синхронного термического анализа. Для достижения цели необходимо было решить следующие задачи: исследовать процесс термоокислительной деструкции исследуемого материала, разработать критерии для оценки степени термического воздействия и получить уравнения для определения температуры воздействия на него.

Материалы и методы. Исследованы образцы гипсовой финишной шпаклевки ROTBAND, часто применяемой для внутренней отделки стен зданий и помещений. Перед испытаниями образцы шпаклевки подвергались предварительному термическому воздействию: 200, 300, 400, 500, 600, 700 и 800 °C в течение 30 мин. Испытания проводились методом синхронного термического анализа (Netzsch STA 449 F5 Jupiter) при скорости нагрева 20 °C/мин, в корундовых тиглях, с расходом воздуха 75 мл/мин.

Результаты исследования и их обсуждение. Установлено, что в качестве критериев для оценки температуры воздействия на гипсовую шпаклевку методами термического анализа целесообразно использовать такие термоаналитические характеристики, как потеря массы при температуре 200 °C и зольный остаток при температуре 900 °C. Получены уравнения для расчета температуры воздействия на гипсовый шпаклевочный состав по термоаналитическим характеристикам для образцов проб шпаклевки.

Выводы. Показана возможность применения метода синхронного термического анализа для определения температуры воздействия на исследуемый материал, что весьма важно при анализе особенностей развития пожара в помещении.

Ключевые слова: пожарно-техническая экспертиза; диагностика очага пожара; критерии оценки; температура воздействия; термоаналитические характеристики

Для цитирования: Беззапонная О.В. Изучение особенностей развития пожара с использованием метода синхронного термического анализа // Пожаровзрывобезопасность/Fire and Explosion Safety. 2022. Т. 31. № 5. С. 26–32. DOI: 10.22227/0869-7493.2022.31.05.26-32

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

Using synchronous thermal analysis to study characteristic features of a developing fire

Oksana V. Bezzaponnaya ✉

Ural Institute of the State Fire Service EMERCOM of Russia, Ekaterinburg, Russia

ABSTRACT

Introduction. The purpose of the work is to estimate the temperature of impact on the material under study using the results of synchronous thermal analysis. This task is solved to achieve the pre-set purposes: studying the process of the thermal-oxidative destruction of the material under study, developing thermal impact assessment criteria, and deriving equations to determine the temperature of impact.

Materials and methods. Specimens of ROTBAND gypsum finishing putty, frequently used for the interior decoration of walls of buildings and premises, have been studied. Before testing, putty samples were subjected to the preliminary thermal impact of 200, 300, 400, 500, 600, 700, and 800 °C for 30 min. The tests were carried out using the method of synchronous thermal analysis (Netzsch STA 449 F5 Jupiter) in corundum crucibles at a heating rate of 20 °C/min and with an air flow rate of 75 ml/min.

Research results and discussion. Mass loss at a temperature of 200 °C and ash residue at a temperature of 900 °C can be expediently used as the criteria for assessing the temperature of impact on the gypsum putty using thermal analysis methods. Equations are obtained to calculate the temperature of impact on the gypsum putty composition according to the thermos-analytical characteristics of putty specimens.

Conclusions. The study demonstrates that synchronous thermal analysis can be applied to determine the temperature of impact on the material under study, which is vital for the analysis of a developing indoor fire.

Keywords: fire investigation; fire seat diagnostics; assessment criteria; impact temperature; thermos-analytical characteristics

For citation: Bezzaponnaya O.V. Using synchronous thermal analysis to study characteristic features of a developing fire. *Pozharovzryvobezopasnost/Fire and Explosion Safety*. 2022; 31(5):26-32. DOI: 10.22227/0869-7493.2022.31.05.26-32 (rus).

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

Введение

При производстве пожарно-технической экспертизы решается ряд важных задач: определяется механизм и место возникновения пожара, пути распространения горения, устанавливается причина пожара. Решению этих задач помогает информация о степени термического поражения строительных материалов. Оценка степени термического воздействия на материал предполагает исследование закономерностей его термоокислительной деструкции.

В качестве исследуемого материала был выбран финишный шпаклевочный состав на гипсовой основе, часто применяемый при финишной отделке стен, являясь важным объектом исследования для получения исходной информации для анализа особенностей развития пожара. Толщина нанесения данного материала составляет от 0,2 до 5,0 мм.

Метод термического анализа является одним из самых информативных и точных методов, применяемых для оценки степени термического воздействия на исследуемый материал. В данной работе приведены результаты исследований гипсовой финишной шпаклевки ROTBAND методом синхронного термического анализа (СТА) для установления температуры воздействия на нее.

В настоящее время накоплен уже значительный экспериментальный материал исследования процесса термоокислительной деструкции различных строительных материалов [1–4], что весьма ценно для использования полученных результатов в целях пожарно-технической экспертизы. Изменение термоаналитических характеристик исследуемых материалов при повышении температуры воздействия на них позволяет не только охарактеризовать процесс термоокислительной деструкции материала, но и определить зависимость этих характеристик от температуры воздействия, что очень важно для оценки степени термического воздействия на исследуемый материал. Методом термического анализа исследованы такие строительные материалы как бетон [5–8], цементный камень [9, 10], гипс [11, 12], древесина [13–15], получены результаты, позволяющие оценить степень термического поражения материала. Большое число публикаций посвящено исследованию процесса термоокислительной деструкции лакокрасочных покры-

тий [16] и огнезащитных составов интумесцентного типа [17–24], часто применяемых для огнезащиты металлоконструкций.

В качестве критериев для определения температуры воздействия на исследуемый материал необходимо использовать термоаналитические характеристики, которые имеют с ней высокую корреляционную связь. Безусловно, для материалов разной химической природы это будут разные термоаналитические характеристики. В данной статье будет рассмотрен термолиз гипсовой шпаклевки и выбор критериев для расчета температуры воздействия на данный материал.

Результаты исследования и их обсуждение

Для подготовки образцов проб и проведения исследований методом синхронного термического анализа (СТА) гипсовая финишная шпаклевка ROTBAND была нанесена на полимерную подложку для полного высыхания. Исследование образцов материала проводили на приборе Netzsch STA 449 F5 Jupiter в среде воздуха, в корундовых тиглях, в интервале температур, характерном для стандартного (целлюлозного) режима пожара (25–900 °C). При проведении испытаний фиксировались следующие термоаналитические зависимости: термогравиметрическая (ТГ) кривая; дифференциально-термогравиметрическая (ДТГ) кривая; кривая дифференциальной сканирующей калориметрии (ДСК). Термограмма гипсовой финишной шпаклевки ROTBAND, полученная при скорости нагрева 20 °C/мин в корундовых тиглях и расходе воздуха 75 мл/мин, представлена на рис. 1.

Процесс термической деструкции исследуемого материала начинается при температуре 129 °C с интенсивной потерей массы в интервалах температур 100–200 °C и 700–900 °C. Анализ ТГ и ДТГ кривых свидетельствует о 2-стадийном процессе термолиза образцов шпаклевки (две ступени на ТГ кривой и два ДТГ пика на ДТГ кривой). Максимум первого ДТГ пика приходится на температуру 147,1 °C, второго ДТГ пика — на температуру 795,4 °C.

Первая стадия потери массы обусловлена термической деструкцией гипса, входящего в состав шпаклевки. Скорость потери массы на этой стадии

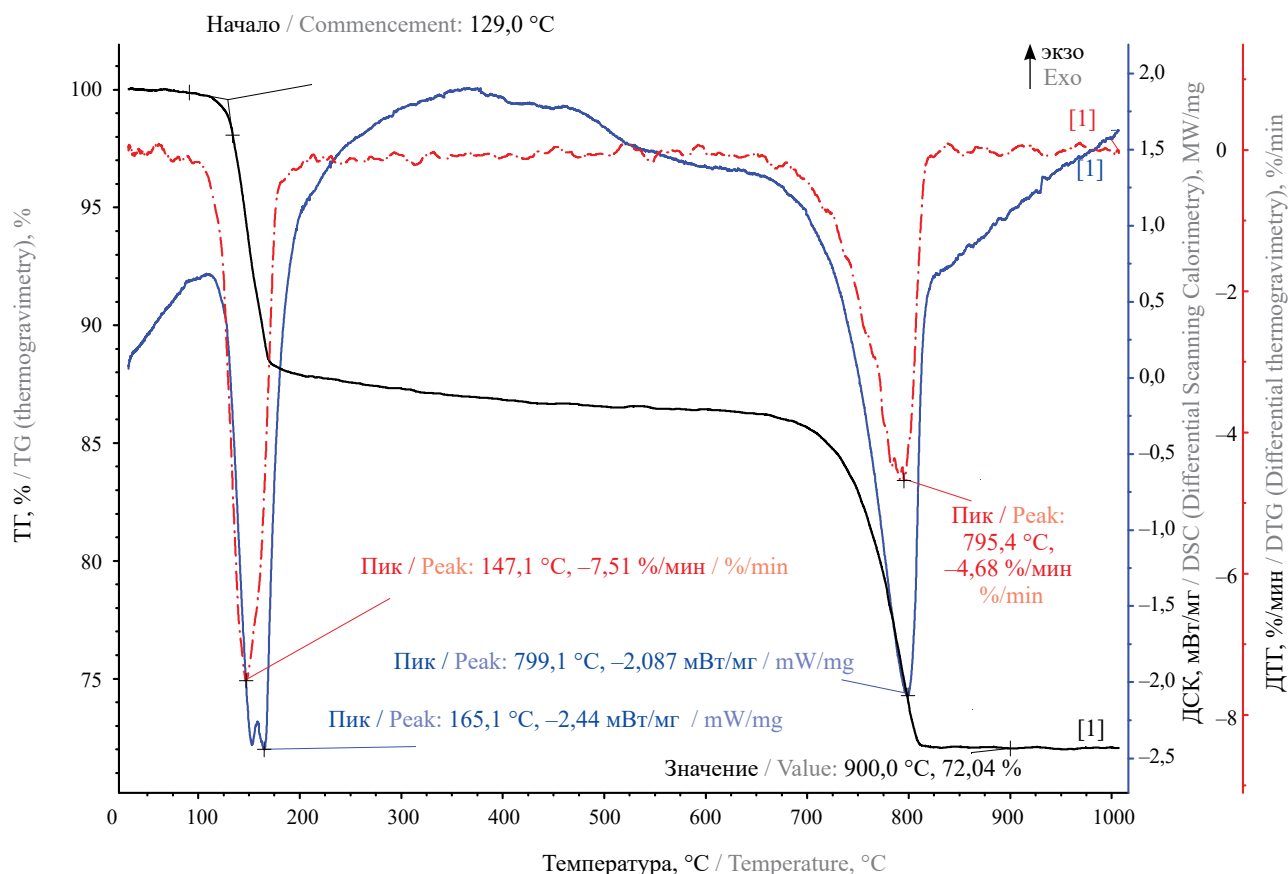


Рис. 1. Термограмма исходной (нативной) гипсовой шпаклевки ROTBAND

Fig. 1. Thermogram of original (native) ROTBAND gypsum putty

достигает 7,51 %/мин. Скорость потери массы на второй стадии, обусловленной разложением карбоната кальция, составила 4,68 %. Зольный остаток анализируемой шпаклевки составил 72,04 %.

На ДСК кривой наблюдаются два эндотермических пика, свидетельствующие о термодеструкции компонентов исследуемого материала. Комплексный эндотермический пик в интервале температур 100–200 °C можно объяснить ступенчатой дегидратацией гипса, основным компонентом которого является сульфат кальция ($\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$). Эндотермический пик при температуре 799,1 °C свидетельствует о термическом разложении карбоната кальция с выделением углекислого газа, что подтверждается результатами масс-спектрального анализа [11].

Для анализа изменений, происходящих с исследуемым материалом при воздействии высоких температур пожара, проведены исследования образцов гипсовой шпаклевки, предварительно подвергнутых термическому воздействию при температурах 200, 300, 400, 500, 600, 700, 800 °C в течение 30 мин. Термограммы образцов шпаклевки, полученные после предварительного нагрева, представлены на рис. 2.

В качестве критериев для определения температуры воздействия на материал выбираются термоаналитические характеристики, для которых

зависимость от температуры воздействия на материал описывается высоким значением коэффициента аппроксимации. При разработке критериев для оценки температуры воздействия на шпаклевочный состав рассматривались такие термоаналитические характеристики, как потеря массы при разных

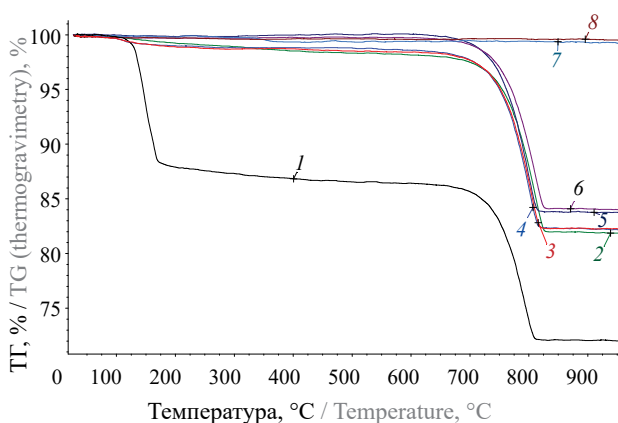


Рис. 2. Термограмма гипсовой финишной шпаклевки ROTBAND после предварительного теплового воздействия: 1 — 25 °C; 2 — 200 °C; 3 — 300 °C; 4 — 400 °C; 5 — 500 °C; 6 — 600 °C; 7 — 700 °C; 8 — 800 °C

Fig. 2. Thermogram of ROTBAND gypsum finishing putty after preliminary thermal exposure: 1 — 25 °C; 2 — 200 °C; 3 — 300 °C; 4 — 400 °C; 5 — 500 °C; 6 — 600 °C; 7 — 700 °C; 8 — 800 °C

температурах, зольный остаток, скорость потери массы при разных температурах, температуры максимумов ДСК пиков, тепловые эффекты фазовых переходов. Наиболее высокие значения коэффициентов аппроксимации показали такие термоаналитические характеристики, как зольный остаток при температуре 900 °С и потеря массы при температуре 200 °С. Для остальных термоаналитических характеристик удовлетворительных зависимостей не получено. График, демонстрирующий влияние температуры на величину зольного остатка, приведен на рис. 3.

Зависимость температуры воздействия от величины зольного остатка удовлетворительно ($R^2 = 0,938$) описывается уравнением полиномиальной зависимости 3-го порядка, по которому можно рассчитать температуру воздействия t , при известном значении зольного остатка анализируемых проб гипсовой финишной шпаклевки ROTBAND с места пожара:

$$t = 143,94 \cdot x^3 - 35\,860 \cdot x^2 + 3 \cdot 10^6 x - 8 \cdot 10^7, \quad (1)$$

где x — зольный остаток финишной гипсовой шпаклевки ROTBAND при температуре 900 °С, %.

График, демонстрирующий влияние температуры на величину потери массы при температуре 200 °С, приведен на рис. 4.

Получено уравнение степенной зависимости для определения температуры воздействия t при известной потере массы при температуре 200 °С образцов гипсовой шпаклевки ($R^2 = 0,9632$):

$$t = 253,43 \cdot x^{-0,883}, \quad (2)$$

где x — потеря массы образца шпаклевки при температуре 200 °С, %.

Для определения итоговой температуры воздействия на исследуемый материал рассчитыва-

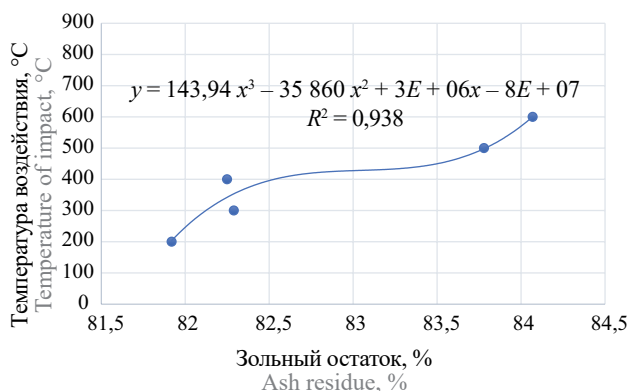


Рис. 3. Влияние температуры воздействия на зольный остаток шпаклевки ROTBAND при 900 °С

Fig. 3. Influence of the temperature of impact on the ash residue of ROTBAND putty at 900 °С

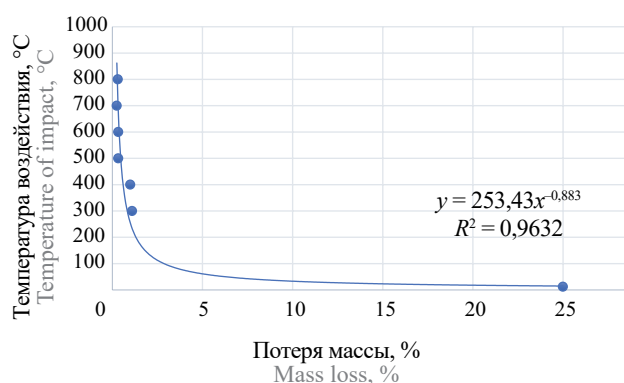


Рис. 4. Влияние температуры воздействия на потерю массы гипсовой шпаклевки ROTBAND при 200 °С

Fig. 4. The effect of temperature on the ROTBAND gypsum putty mass loss at 200 °С

ется среднее арифметическое значение, полученное по уравнениям (1) и (2).

После оценки степени термического воздействия в разных зонах помещения по максимальной температуре воздействия определяется зона с наибольшей температурой, что дает ценную информацию для решения важных задач пожарно-технической экспертизы.

Проверка достоверности результатов определения температуры воздействия на материал показала, что относительная погрешность определения не превышает 5 %.

Выводы

Анализ результатов исследований позволил сделать следующие выводы:

- в качестве критериев оценки температурного воздействия на гипсовые шпаклевочные составы целесообразно рассматривать термоаналитические характеристики, имеющие высокие значения коэффициента аппроксимации зависимостей от температуры предварительного воздействия: зольный остаток при температуре 900 °С, потеря массы при температуре 200 °С;
- получены уравнения, позволяющие рассчитать температуру воздействия на материал при известной потере массы и зольного остатка;
- погрешность определения температуры воздействия на исследуемый материал не превышает 5 %.

Полученная информация позволит пожарно-техническому эксперту определить зоны термических поражений шпаклевки на гипсовой основе и проанализировать особенности развития пожара в помещении.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Ключников В.Ю., Дашко Л.В., Довбня А.В., Плотникова Г.В. Применение методов термического анализа при производстве пожарно-технических экспертиз // Пожаровзрывобезопасность/Fire and Explosion Safety. 2012. Т. 21. № 7. С. 47–51. URL: <https://elibrary.ru/item.asp?id=17853455>
2. Varma A., Rogachev A.S., Mukasyan A.S., Hwang S. Combustion synthesis of advanced materials: principles and applications // Advances in chemical engineering. 1998. Vol. 24. Pp. 79–226. DOI: 10.1016/S0065-2377(08)60093-9
3. Hermawan H., Hadiyanto H., Sunaryo S., Kholil A. Analysis of thermal performance of wood and exposed stone-walled buildings in mountainous areas with building envelop variations // Journal of Applied Engineering Science. 2019. Vol. 17. Issue 3. Pp. 321–332. DOI: 10.5937/jaes17-20617
4. Дашко Л.В., Довбня А.В., Ключников В.Ю., Плотникова Г.В. Применение методов термического анализа при производстве пожарно-технических экспертиз // Вестник Восточно-Сибирского института МВД России. 2012. № 1 (60). С. 59–64. URL: <https://elibrary.ru/item.asp?id=23638887>
5. Флегонтов Д.В., Акулова М.В., Петров А.В., Потемкина О.В. Методика комплексного исследования бетонов, подвергшихся термическому воздействию на пожаре // Современные проблемы гражданской защиты. 2019. № 1 (30). С. 36–43. URL: <https://elibrary.ru/item.asp?id=37288098>
6. Samson G., Phelipot-Mardele A., Lanos C. Thermal and mechanical properties of gypsum-cement foam concrete: effects of surfactant // European Journal of Environmental and Civil Engineering. 2016. Vol 21. Issue 12. Pp. 1–20. DOI: 10.1080/19648189.2016.1177601
7. Корзанов В.С., Красновских М.П. Влияние термического воздействия на прочность бетона // Вестник Пермского университета. Серия: химия. 2020. Т. 10. Вып. 3. С. 277–284. DOI: 10.17072/2223-1838-2020-3-277-284
8. Annerel E., Taerwe L. Damage assessment of concrete structures exposed to fire // IABSE Conference, Rotterdam 2013: Assessment, Upgrading and Refurbishment of Infrastructures. Rotterdam, Netherlands. 2013. Pp. 112–113. DOI: 10.2749/222137813806474417
9. Дашко Л.В., Синюк В.Д., Плотникова Г.В. Экспертное исследование цементного камня после высокотемпературного воздействия // Пожаровзрывобезопасность/Fire and Explosion Safety. 2015. Т. 24. № 12. С. 22–32. DOI: 10.18322/PVB.2015.24.12.22-32
10. Плотникова Г.В., Дашко Л.В., Ключников В.Ю., Синюк В.Д. Применение методов термического анализа при исследовании цементного камня // Вестник Восточно-Сибирского института Министерства внутренних дел России. 2013. № 2 (65). С. 47–54. URL: <https://elibrary.ru/item.asp?id=23272420>
11. Беззапонная О.В., Акулов А.Ю., Порхачев М.Ю. Исследование термостойкости современных строительных материалов методом синхронного термического анализа // Техносферная безопасность. 2017. № 1 (14). С. 3–12. URL: <https://elibrary.ru/item.asp?id=28857749>
12. Наймушин Е.В., Дементьев Ф.А., Минкин Д.Ю. Исследование гипса методом синхронного термического анализа для целей установления температурного режима нагрева // Технологии техносферной безопасности. 2013. № 6(52). Ст. 9. URL: <https://elibrary.ru/item.asp?id=21487182>
13. Беззапонная О.В. Оценка температуры воздействия на древесину в условиях пожара методами термического анализа // Техносферная безопасность/Technosphere safety. 2020. № 3 (28). С. 70–80. URL: <https://elibrary.ru/item.asp?id=44023010>
14. Candelier K., Thevenon M.-F., Petrissans A., Dumarcay S., Gerardin P., Petrissans M. Control of wood thermal treatment and its effects on decay resistance: a review // Annals of Forest Science. 2016. Vol. 73. Issue 3. Pp. 571–583. DOI: 10.1007/s13595-016-0541-x
15. Сивенков А.Б. Влияние физико-химических характеристик древесины на ее пожарную опасность и эффективность огнезащиты : дис. ... д-ра физ.-мат. наук. М., 2015. 289 с.
16. Принцева М.Ю., Лобатова О.В. Определение степени термического поражения лакокрасочных покрытий методом синхронного термического анализа // XXI век: итоги прошлого и проблемы настоящего плюс. 2022. Т. 11. № 2. С. 131–136. DOI: 10.46548/21vek-2022-1158-0023 URL: <https://elibrary.ru/item.asp?id=48699715>
17. Беззапонная О.В., Пискашева А.С., Ефимов И.А., Выгузова Е.В., Глухих П.А. Диагностика температуры воздействия пожара на огнезащитные покрытия интумесцентного типа методами термического анализа // Техносферная безопасность/Technosphere safety. 2019. № 4 (25). С. 73–81. URL: <https://elibrary.ru/item.asp?id=41752965>
18. Jimenez M., Duquesne S., Bourbigot S. Kinetic analysis of the thermal degradation of an epoxy-based intumescent coating // Polymer Degradation and Stability. 2009. Vol. 94. Issue 3. Pp. 404–409. DOI: 10.1016/j.polymdegradstab.2008.11.021
19. Беззапонная О.В., Головина Е.В., Акулов А.Ю., Калач А.В., Шаранов С.В., Калач Е.В. Пути

- совершенствования огнезащитных терморасширяющихся составов для использования на объектах нефтегазового комплекса // Пожаровзрывобезопасность/Fire and Explosion Safety. 2017. Т. 26. № 12. С. 14–24. DOI: 10.18322/PVB.2017.26.12.14-24
20. Fang W.Z., Zeng X.R., Lai X.J., Li H.Q., Chen W.J., Zhang Y.J. Thermal degradation mechanism of addition-cure liquid silicone rubber with urea-containing silane // *Thermochimica Acta*. 2015. Vol. 605. Pp. 28–36. DOI: 10.1016/j.tca.2015.02.011
 21. Palacios A., Gracia A., Haurie L., Cabeza L.F., Fernández A.I., Barreneche C. Study of the thermal properties and the fire performance of flame retardant-organic PCM in bulk form // *Materials*. 2018. Vol. 11. P. 117. DOI: 10.3390/ma11010117
 22. Bezzaponnaya O.V., Golovina E.V. Effect of mineral fillers on the heat resistance and combustibility of an intumescent fireproofing formulation on silicone base // *Russian Journal of Applied Chemistry*. 2018. Vol. 91. Issue 1. Pp. 96–100. DOI: 10.1134/S1070427218010159
 23. Fateha T., Guillaume E., Joseph P. An experimental study of the thermal performance of a novel intumescent fire protection coating // *Fire Safety Journal*. 2017. Vol. 92. Pp. 132–141. DOI: 10.1016/j.firesaf.2017.05.021
 24. Ustinov A., Babikova A., Zybina O., Lobov D., Printseva M., Klaptyuk I. u òp. Improvement of methodology for assessing fire-protective efficiency of intumescent coatings applied on metal constructions // *E3S Web of Conferences*. 2021. Vol. 320. P. 02009. DOI: 10.1051/e3sconf/202132002009

REFERENCES

1. Klyuchnikov V.Yu., Dashko L.V., Dovbnya A.V., Plotnikova G.V. Application of methods of the thermal analysis in production of fire investigations. *Pozharovzryvobezopasnost/Fire and Explosion Safety*. 2012; 21(7):47-51. URL: <https://elibrary.ru/item.asp?id=17853455> (rus).
2. Varma A., Rogachev A.S., Mukasyan A.S., Hwang S. Combustion synthesis of advanced materials: principles and applications. *Advances in Chemical Engineering*. 1998; 24:79-226. DOI: 10.1016/S0065-2377(08)60093-9
3. Hermawan H., Hadiyanto H., Sunaryo S., Kholil A. Analysis of thermal performance of wood and exposed stone-walled buildings in mountainous areas with building envelop variations. *Journal of Applied Engineering Science*. 2019; 17(3):321-332. DOI: 10.5937/jaes17-20617
4. Dashko L.V., Dovbnya A.V., Klyuchnikov V.Yu., Plotnikova G.V. Application of thermal analysis methods in the production of fire-technical examinations. *Vestnik of the East Siberian Institute of the MIA of Russia*. 2012; 1(60):59-64. URL: <https://elibrary.ru/item.asp?id=23638887> (rus).
5. Flegontov D.V., Akulova M.V., Petrov A.V., Potemkina O.V. Technique of complex research of concretes, exposed to thermal exposure to fire. *Modern Problems of Civil Protection*. 2019; 1(30):36-43. URL: <https://elibrary.ru/item.asp?id=37288098> (rus).
6. Samson G., Phelipot-Mardele A., Lanos C. Thermal and mechanical properties of gypsum-cement foam concrete: effects of surfactant. *European Journal of Environmental and Civil Engineering*. 2016; 21(12): 1-20. DOI: 10.1080/19648189.2016.1177601
7. Korzanov V.S., Krasnovskikh M.P. The effect of thermal exposure on the strength of concrete. *Bulletin of Perm University. Chemistry*. 2020; 10(3):277-284. DOI: 10.17072/2223-1838-2020-3-277-284 (rus).
8. Annerel E., Taerwe L. Damage assessment of concrete structures exposed to fire. *LABSE Conference, Rotterdam 2013: Assessment, Upgrading and Refurbishment of Infrastructures*. Rotterdam, Netherlands, 2013; 112-113. DOI: 10.2749/222137813806474417
9. Dashko L.V., Sinyuk V.D., Plotnikova G.V. Expert study of cement paste after exposure to high temperatures. *Pozharovzryvobezopasnost/Fire and Explosion Safety*. 2015; 24(12):22-32. DOI: 10.18322/PVB.2015.24.12.22-32 (rus).
10. Plotnikova G.V., Dashko L.V., Klyuchnikov V.Yu., Sinyuk V.D. Application of methods of thermal analysis in the study of the cement stone. *Vestnik of the East Siberian Institute of the MIA of Russia*. 2013; 2(65): 47-54. URL: <https://elibrary.ru/item.asp?id=23272420>
11. Bezzaponnaya O.V., Akulov A.Yu., Porkhachev M.Yu. The study of the thermal stability of modern building materials by the method of synchronous thermal analysis. *Tekhnosferная bezopasnost/Technosphere safety*. 2017; 1(14):3-12. URL: <https://elibrary.ru/item.asp?id=28857749> (rus).
12. Naymushin E.V., Dementyev F.A., Minkin D.Yu. The study of the thermal stability of modern building materials by the method of synchronous thermal analysis. *Technology of Technosphere Safety*. 2013; 6(52):9. URL: <https://elibrary.ru/item.asp?id=21487182> (rus).
13. Bezzaponnaya O.V. Evaluation of exposure temperature on wood under fire conditions by thermal analysis methods. *Tekhnosferная bezopasnost/Technosphere safety*. 2020; 3(28):70-80. URL: <https://elibrary.ru/item.asp?id=44023010> (rus).
14. Candelier K., Thevenon M.-F., Petrisans A., Dumarçay S., Gerardin P., Petrisans M. Control of wood thermal treatment and its effects on decay resistance: a review. *Annals of Forest Science*. 2016; 73(3): 571-583. DOI: 10.1007/s13595-016-0541-x
15. Sivenkov A.B. Influence of physical and chemical characteristics of wood on its fire hazard and fire

- protection efficiency : dissertation of the Doctor of Physical and mathematical Sciences. Moscow, 2015; 289. (rus).
16. Printseva M.Yu., Lobatova O.V. Determination of the degree of thermal damage to paint coatings by synchronous thermal analysis. *XXI Century: Resumes of the Past and Challenges of the Present plus*. 2022; 11(2): 131-136. DOI: 10.46548/21vek-2022-1158-0023 URL: <https://elibrary.ru/item.asp?id=48699715> (rus).
 17. Bezzaponnaya O.V., Piskasheva A.S., Efimov I.A., Vyuzova E.V., Glukhikh P.A. Diagnostic of fire exposure temperature on fire protective coatings of an intumescent type by methods of thermal analysis. *Tekhnosfernaya bezopasnost/Technosphere safety*. 2019; 4(25):73-81. URL: <https://elibrary.ru/item.asp?id=41752965> (rus).
 18. Jimenez M., Duquesne S., Bourbigot S. Kinetic analysis of the thermal degradation of an epoxy-based intumescent coating. *Polymer Degradation and Stability/ Polymer Degradation and Stability*. 2009; 94:404-409. DOI: 10.1016/j.polymdegradstab.2008.11.021
 19. Bezzaponnaya O.V., Golovina E.V., Akulov A.Yu., Kalach A.V., Sharapov S.V., Kalach E.V. Ways of improving the fire protecting thermal expanding compositions for use in oil and gas industry. *Pozharovzryvbezopasnost/Fire and Explosion Safety*. 2017; 26(12):14-24. DOI: 10.18322/PVB.2017.26.12.14-24 (rus).
 20. Fang W.Z., Zeng X.R., Lai X.J., Li H.Q., Chen W.J., Zhang Y.J. Thermal degradation mechanism of addition-cure liquid silicone rubber with urea-containing silane. *Thermochimica Acta*. 2015; 605:28-36. DOI: 10.1016/j.tca.2015.02.011
 21. Palacios A., De Gracia A., Haurie L., Cabeza L.F., Fernández A.I., Barreneche C. Study of the thermal properties and the fire performance of flame retardant-organic PCM in bulk form. *Materials*. 2018; 11:117. DOI: 10.3390/ma11010117
 22. Bezzaponnaya O.V., Golovina E.V. Effect of mineral fillers on the heat resistance and combustibility of an intumescent fireproofing formulation on silicone base. *Russian Journal of Applied Chemistry*. 2018; 91(1):96-100. DOI: 10.1134/S1070427218010159
 23. Fateha T., Guillaume E., Joseph P. An experimental study of the thermal performance of a novel intumescent fire protection coating. *Fire Safety Journal*. 2017; 92:132-141. DOI: 10.1016/j.firesaf.2017.05.021
 24. Ustinov A., Babikova A., Zybina O., Lobov D., Printseva M., Klapyuk I. et al. Improvement of methodology for assessing fire-protective efficiency of intumescent coatings applied on metal constructions. *E3S Web of Conferences*. 2021; 320:02009. DOI: 10.1051/e3sconf/202132002009

Поступила 20.07.2022, после доработки 13.09.2022;
принята к публикации 19.09.2022

Received July 20, 2022; Received in revised form September 13, 2022;
Accepted September 19, 2022

Информация об авторах

БЕЗЗАПОННАЯ Оксана Владимировна, канд. техн. наук, доцент, почетный работник науки и высоких технологий Российской Федерации, доцент кафедры криминалистики и инженерно-технических экспертиз, Уральский институт Государственной противопожарной службы Министерства Российской Федерации по делам гражданской обороны, чрезвычайным ситуациям и ликвидации последствий стихийных бедствий, Россия, 620062, г. Екатеринбург, ул. Мира, 22; РИНЦ ID: 119257; ResearcherID: R-8727-2019; Scopus Author ID: 6504618195; ORCID: 0000-0001-6566-448X; e-mail: bezzaponnaya@mail.ru

Information about the authors

Oksana V. BEZZAPONNAYA, Candidate of Technical Sciences, Associate Professor, Honorary Worker of Science and High Technologies of the Russian Federation, Associate Professor of the Department of Criminalistics and Engineering and Technical Expertise, Ural Institute of the of State Fire Service of the Ministry of the Russian Federation for Civil Defense, Emergencies and Elimination on Consequences of Natural Disasters, Mira St., 22, Ekaterinburg, 620062, Russian Federation; ID RISC: 119257; ResearcherID: R-8727-2019; Scopus Author ID: 6504618195; ORCID: 0000-0001-6566-448X; e-mail: bezzaponnaya@mail.ru

ПОЖАРОВЗРЫВБЕЗОПАСНОСТЬ/FIRE AND EXPLOSION SAFETY. 2022. Т. 31. № 5. С. 33–42
POZHAROVZRYVOBEZOPASNOST/FIRE AND EXPLOSION SAFETY. 2022; 31(5):33-42

НАУЧНАЯ СТАТЬЯ/RESEARCH PAPER

УДК 614.841

<https://doi.org/10.22227/0869-7493.2022.31.05.33-42>

Расчет пределов огнестойкости строительных конструкций здания теплоэлектростанции

Сергей Викторович Пузач, Татьяна Юрьевна Еремина,
Федор Александрович Портнов ✉

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

АННОТАЦИЯ

Введение. В данной статье проведены расчеты фактических пределов огнестойкости металлических конструкций для одного из зданий теплоэлектростанции. Известно, что фактические пределы огнестойкости строительных конструкций определяются экспериментальными и расчетными методами. Исследования для решения задачи были основаны на температурном режиме реальных условий пожара.

Цель и задачи исследования. Целью анализа является определение фактических пределов огнестойкости строительных конструкций здания теплоэлектростанции методом расчета тепломассообмена, учитывающим реальные условия пожара. В соответствии с поставленной целью необходимо решить следующие задачи:

- провести анализ основных положений нормативно-технической документации в части требований пожарной безопасности к строительным конструкциям теплоэлектростанций;
- обосновать основные положения для метода расчета тепломассообмена, учитывающего реальные условия пожара;
- обосновать необходимость повышения фактических пределов огнестойкости с помощью огнезащитных средств с учетом наиболее опасного сценария развития реального пожара.

Методы исследования. Уравнение теплопроводности рассматривается для определения распределения температур внутри строительной конструкции в одномерном случае. Для решения данной задачи применен полевой метод расчета, который используется для помещений сложной геометрической конфигурации, в которых один из геометрических размеров гораздо больше остальных.

Результаты и их обсуждение. В работе проводится анализ наиболее опасного сценария пожара, который характеризуется наиболее опасным воздействием на металлоконструкции — пожар мазута, разлитого в котельном отделении.

Рассматривается наиболее опасный сценарий развития пожара с точки зрения нагрева несущих металлических конструкций — горение пролива мазута в котельном отделении. Результаты расчетов показали, что при выбранном сценарии развития пожара максимальные температуры несущих металлических конструкций в течение 15 мин от начала пожара существенно меньше критической температуры 500 °С.

Выводы. На основании анализа расчета огнестойкости конструкций ТЭЦ, в частности металлоконструкций, было заключено, что их огнестойкость при возникновении чрезвычайной ситуации с наиболее опасными проявлениями пожара превышает требуемый R15. Огнезащита несущих металлических конструкций, расположенных в котельном отделении объекта, не требуется.

Ключевые слова: фактический предел огнестойкости; сценарий пожара; полевая модель; тепломассообмен; прогрев конструкций

Для цитирования: Пузач С.В., Еремина Т.Ю., Портнов Ф.А. Расчет пределов огнестойкости строительных конструкций здания теплоэлектростанции // Пожаровзрывобезопасность/Fire and Explosion Safety. 2022. Т. 31. № 5. С. 33–42. DOI: 10.22227/0869-7493.2022.31.05.33-42

✉ Портнов Федор Александрович, e-mail: f.portnov@ikbs-mgsu.ru

Building structures of thermal power plants: analysis of fire resistance limits

Sergey V. Puzach, Tatyana Yu. Eremina, Fedor A. Portnov ✉

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

ABSTRACT

Introduction. The author analyzes real-life fire resistance limits of metal structures for one building of a thermal power plant. Experimental and computational methods were applied to identify the fire resistance limits of

building structures. The temperature setting of the research, conducted to solve the problem, was the same as that of a real fire.

Research goal and objectives. The purpose of the analysis is to identify the fire resistance limits of structures comprising the building of a thermal power plant using the method of heat-mass exchange analysis that takes account of conditions of a real fire. The following objectives are to be attained in compliance with the pre-set goal:

- to analyze the principal provisions of technical norms and regulations in terms of the fire safety of building structures of thermal power plants;
- to justify the principal provisions for the method of heat-mass exchange analysis, taking into account real-life fire conditions;
- to justify the need to improve the real-life fire resistance limits by fire-proofing agents with account taken of the most dangerous scenario of the real fire development.

Methods of research. The heat-transfer equation is analyzed to identify the distribution of temperatures inside a building structure for a one-dimensional case. The field-based method of analysis is applied to solve this problem. This method is generally applied to premises having complex geometric configuration, if one geometric dimension exceeds the others.

Results and their discussion. The authors have analyzed the most dangerous fire scenario characterized by the most dangerous impact on metal structures, such as the furnace oil fire spill in a boiler room.

The authors also address the most dangerous fire propagation scenario in terms of the heating of bearing metal structures: the combustion of furnace oil spills in a boiler room. The computations have proven that in case of the selected fire development scenario maximal temperatures of bearing metal structures are much lower than the critical temperature of 500 °C fifteen minutes after the onset of fire.

Conclusions. Having analyzed the fire resistance computations of thermal power plant structures, including their metal constructions, the have found that in case of emergency, resistance to the most dangerous manifestations of fire exceeds the required R15 value. No fireproofing of bearing metal structures in the boiler room is needed.

Keywords: real-life fire resistance limit; fire scenario; field model; heat-mass exchange; heating of structures

For citation: Puzach S.V., Eremina T.Yu., Portnov F.A. Building structures of thermal power plants: analysis of fire resistance limits. *Pozharovzryvbezopasnost/Fire and Explosion Safety*. 2022; 31(5):33-42. DOI: 10.22227/0869-7493.2022.31.05.33-42 (rus).

✉ Fedor Aleksandrovich Portnov, e-mail: f.portnov@ikbs-mgsu.ru

Введение

«Пожарную опасность теплоэлектроцентралей (ТЭЦ) в соответствии с нормативными документами рассматривают с учетом временных параметров развития и распространения опасных факторов пожара, что

позволяет определить риск для людей и конструкций объектов и выбрать наиболее эффективные системы противопожарной защиты» [1].

Для исследования распределения температур внутри строительной конструкции и определения фактического предела огнестойкости необходимо учитывать условия реального пожара. На ТЭС все энергоблоки размещаются в одном здании, что при авариях повышает опасность распространения пожара, и как результат — выхода из строя нескольких агрегатов ТЭС [2–4].

На основании Федерального закона от 21.07.1997 № 116-ФЗ «О промышленной безопасности опасных производственных объектов», к основным составляющим объектов ТЭС, идентифицированных по предельному количеству опасных веществ, определяющих риск поражающего воздействия на персонал, население и прилегающую территорию, относятся система мазутоснабжения, цех химводоочистки с баками химреагентов, система маслоснабжения ТЭЦ. В работах [5, 6] описывается возможный значительный ущерб в случае возникновения чрезвычайных ситуаций на объектах ТЭС.

Здания ТЭЦ — здания 1–2-й степени огнестойкости. Главный корпус включает в себя котельный цех, машинный зал, служебные помещения, главный щит управления и распределительные устройства генераторного напряжения. Распределительные устройства высокого напряжения располагаются отдельно от главного корпуса.

Согласно статистике, порядка 90 % крупных аварий вызваны отказами в работе оборудования и сопровождаются пожаром, 10 % являются следствием повреждений строительных конструкций.

На территории ТЭЦ-27 (Мытищи) 11 июля 2019 г. загорелась газовая станция высокого давления, площадь возгорания составила 200 м² (рис. 1).

На Абаканской ТЭЦ (Хакасия) 21 марта 2019 г. произошло возгорание угольной пыли над подачей котла № 2; пожар, охвативший площадь в 10 м², был потушен. Погибших и пострадавших не было.

На Новомосковской ТЭЦ (Новомосковская ГРЭС — производственное подразделение филиала «Центральная генерация» ПАО «Квадра») в Тульской области 1 марта 2019 г. при осмотре было обнаружено возгорание трансформатора, которое



Рис. 1. Пожар на территории ТЭЦ (Мытищи)

Fig. 1. Fire on the territory of the thermal power plant (Mytishchi)

ликвидировали пожарные. Трансформатор был поврежден, потребовалась его замена.

На Челябинской ТЭЦ-2 16 октября 2018 г. произошла технологическая вспышка без последующего горения, пострадал работник предприятия. Из-за утечки и возгорания водорода из корпуса газоохладителя генератора был отключен турбогенератор.

На территории ТЭЦ № 22 (Дзержинский Московской области) 31 августа 2017 г. загорелось масло на площади 10 м². Специалистам удалось ликвидировать открытое горение.

На территории ТЭЦ-2 в Ленинском районе Новосибирска 26 августа 2017 г. после взрыва трансформатора произошел пожар. Возгорание было ликвидировано, никто не пострадал. Происшествие привело к отключениям света в Новосибирске.

В помещении циркуляционной насосной ТЭЦ-21 на севере Москвы 29 мая 2017 г. в результате урагана, вызвавшего повреждение линий электропередачи, произошло короткое замыкание. Возникшее задымление было оперативно ликвидировано, в результате инцидента никто не пострадал.

На Орской ТЭЦ-1 в Оренбургской области 4 мая 2017 г. произошло возгорание градирни из-за нарушения правил техники безопасности работниками подрядной организации во время проведения покрасочных работ. Площадь пожара составила 1,2 тыс. м². Люди не пострадали, эвакуация сотрудников ТЭЦ-1 не производилась. Огнем было повреждено внутреннее оборудование градирни¹.

Известно, что конструкция с фактическим пределом огнестойкости сохраняет свою несущую

функцию в течение периода времени, необходимого для обеспечения безопасности:

$$R_f > R_{req}, \quad (1)$$

где R_f — фактическое значение предела огнестойкости конструкции;

R_{req} — требуемое значение предела огнестойкости конструкции.

При определении пределов огнестойкости металлических конструкций котельного отделения здания теплоэлектростанции использован метод расчета тепломассообмена, учитывающий реальные условия пожара [7, 8].

Оценка реального пожара проводилась с применением полевого расчетного метода оценки динамики развития опасных факторов пожара, который основывается на научно-технических трудах [9–12] и реализован методами компьютерно-математического моделирования [13–15].

Целью анализа является определение фактических пределов огнестойкости строительных конструкций здания теплоэлектростанции методом расчета тепломассообмена, учитывающим реальные условия пожара. Для этого необходимо: провести анализ основных положений нормативно-технической документации в части требований пожарной безопасности к строительным конструкциям теплоэлектростанций, а также научно-технической литературы, описывающей динамику тепломассообменных процессов при пожарах; обосновать основные положения для метода расчета тепломассообмена, учитывающего реальные условия пожара; обосновать необходимость повышения фактических пределов огнестойкости с помощью огнезащитных средств с учетом наиболее опасного сценария развития реального пожара.

Методология расчета

На основании методик оценки расчетных величин пожарного риска в зданиях и сооружениях был произведен выбор конкретной модели расчета динамики развития опасных факторов пожара^{2, 3}. С учетом сложности поставленной задачи, связанной с особенностями объемно-планировочных решений, была выбрана полевая модель расчета.

«В методике оценки расчетных величин пожарного риска приведена полевая модель пожара, кото-

¹ ЧП на российских ТЭЦ в 2017–2019 годах. URL: <https://ria.ru/20190711/1556417484.html>

² Методика определения расчетных величин пожарного риска в зданиях, сооружениях и строениях различных классов функциональной пожарной опасности. Приложение к приказу МЧС России от 30.06.2009 № 382.

³ Изменения, вносимые в методику определения расчетных величин пожарного риска в зданиях, сооружениях и строениях различных классов функциональной пожарной опасности, утвержденные приказом МЧС России от 30.06.2009 № 382. Приложение к приказу МЧС России от 12.12.2011 № 749.

рая используется для расчета тепломассообмена. Данная модель отличается применением нестационарных трехмерных дифференциальных уравнений. В данных уравнениях учтены законы сохранения массы, импульса и энергии применительно к газовой среде помещения, а также для характеристики аэрозолей дыма, в частности, их оптической плотности и для компонентов газовой среды» [1]. Для применения полевой модели были использованы основы динамики тепломассообменных процессов при пожарах [16–22].

Трехмерные дифференциальные уравнения, используемые в методике оценки расчетных величин пожарного риска, приведены в удобный для применения и численного решения вид [23]:

$$\frac{\partial}{\partial \tau}(\rho \Phi) + \operatorname{div}(\rho w \Phi) = \operatorname{div}(\Gamma \operatorname{grad} \Phi) + S, \quad (2)$$

где τ — время, с;

ρ — плотность, кг/м³;

Φ — зависимая переменная (энтальпии газовой смеси и материала стен и перекрытия, проекции скорости на координатные оси, концентрации компонентов газовой смеси, кинетическая энергия турбулентности и скорость ее диссипации, характеристики аэрозолей дыма — массовая концентрация и оптическая плотность);

w — скорость, м/с;

Γ — коэффициент диффузии для Φ ;

S — источниковый член.

Используемые здесь и далее величины усреднены по времени.

Используется k - ϵ модель турбулентности со следующим набором эмпирических констант [24]: $C_1 = 1,44$; $C_2 = 1,92$; $\sigma_k = 1,0$; $\sigma_\epsilon = 1,3$; $C_\mu = 0,09$. Эффективная вязкость газа в уравнении (2) представлена в виде $\mu_{\text{эф}} = \mu + \mu_t$, эффективная теплопроводность $\lambda_{\text{эф}} = \lambda + \lambda_t + \lambda_\tau$, эффективная диффузия $D_{\text{эф}} = D + D_t$ [1].

Для дополнительного свидетельства о надежности результатов проводится оценка турбулентного тепломассообмена с использованием модели Смагоринского [25].

По формуле Сазерленда проводится оценка вязкости газа, а по формуле Колмогорова [24] — турбулентная вязкость. Из соотношения $\lambda_t = c_p \mu_t / \operatorname{Pr}_t$ проводится оценка коэффициента турбулентной теплопроводности, а коэффициента турбулентной диффузии — из соотношения $D_t = \mu_t / \rho \operatorname{Pr}_d$. Принимаем, что $\operatorname{Pr}_t = \operatorname{Pr}_d = 1$ [26].

Для проведения оценки лучистого теплопереноса используется «метод моментов» (диффузионный метод) [26]. При этом $\lambda_d = 0$, а источниковый член в уравнении энергии равен:

$$S_d = -\frac{4\pi}{3} \left(\frac{\partial^2 I_o}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 I_o}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 I_o}{\partial z^2} \right), \quad (3)$$

где I_o — интенсивность излучения, оценка которой проводится по уравнению:

$$\frac{1}{k} \left(\frac{\partial^2 I_o}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 I_o}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 I_o}{\partial z^2} \right) = 3\chi(I_o - I_b), \quad (4)$$

где k, χ — интегральные коэффициенты ослабления и излучения среды;

x, y, z — координаты вдоль длины, ширины и высоты соответственно;

$I_b = \sigma T^4$ — интенсивность излучения абсолютно черного тела;

σ — постоянная излучения абсолютно черного тела;

T — температура.

Вводим условие, что локальный коэффициент излучения и интегральный коэффициент ослабления излучения равны. Тогда локальный интегральный коэффициент ослабления излучения определяется исходя из локальной величины оптической плотности дыма [1]:

$$K = \lambda^* W, \quad (5)$$

где λ^* — коэффициент для пересчета оптического диапазона излучения в инфракрасный;

W — локальная величина оптической плотности дыма, определяемая из решения соответствующего уравнения (8).

Массовая скорость газификации горючей жидкости:

$$\tau \leq \tau_{\text{ст}} / \Psi = \Psi_{\text{уд}} F_\Gamma \sqrt{\tau / \tau_{\text{ст}}}, \quad (6)$$

$$\tau > \tau_{\text{ст}} / \Psi = \Psi_{\text{уд}} F_\Gamma, \quad (7)$$

где $\tau_{\text{ст}}$ — время стабилизации горения;

$\Psi_{\text{уд}}$ — удельная массовая скорость газификации пожарной нагрузки.

Скорость выделения оптической плотности дыма при горении горючего материала:

$$W = W_{\text{уд}} \Psi. \quad (8)$$

Зона, в которой происходит горение, определяется равномерно распределенными в объеме области горения источниками массы и тепла [1].

Для уравнения (2) задаются следующие граничные условия:

- проекции скоростей на участках внутренних поверхностей ограждающих конструкций равны нулю; для уравнения энергии задаются

граничные условия 3-го рода; для остальных параметров принимается, что $\partial\Phi/\partial n = 0$;

- в области истечения газа наружу на открытом проеме $\partial\Phi/\partial n = 0$,

где n — нормаль к поверхности; области, в которые поступает наружный воздух, основные характеристики воздуха (давление, температура и концентрация компонентов) соответствуют параметрам атмосферного воздуха.

Приведенное ранее уравнение (2) решается с использованием метода контрольных объемов по неявной конечно-разностной схеме на шахматной сетке с помощью продольно-поперечной прогонки. При этом используется уравнение для поправки давления в сжимаемой форме. Распределение параметров газовой среды внутри каждого контрольного объема принимается соответствующим схеме с разностями против потока. Контроль точности расчетов производится за счет выполнения локального и интегрального законов сохранения массы и энергии в расчетной области.

«Расчет прогрева ограждающих конструкций проводится на основе трехмерных дифференциальных уравнений теплопроводности, решенных совместно с системой уравнений» (2).

Полевая модель включена в нормативные методики расчета динамики опасных факторов пожара.

Более подробно описание математической модели приведено в [23]. Там же представлены результаты сопоставления расчета по предложенной модели с аналитическими решениями, интегральной моделью и экспериментальными данными.

Математическая модель расчета прогрева строительных конструкций

«Для определения распределения температур внутри строительной конструкции в одномерном случае решается уравнение теплопроводности» [1]:

$$\rho c \frac{\partial T}{\partial \tau} = \frac{\partial}{\partial y} \left(\lambda \frac{\partial T}{\partial y} \right), \quad (9)$$

где ρ — плотность материала конструкции, кг/м³;
 c — удельная теплоемкость материала конструкции, Дж/(кг·К);
 T — температура, К;
 τ — время, с;
 λ — коэффициент теплопроводности материала конструкции, Вт/(м·К);
 y — координата, направленная по толщине стенки конструкции, м.

Уравнение (9) решается численным методом контрольных объемов.

Предполагаем идеальный тепловой контакт между слоями конструкции, изготовленными из различных материалов, что также является наиболее опасным вариантом с точки зрения нагрева конструкции [1].

Граничные условия к уравнению (9) являются граничными условиями 2-го рода. Плотность теплового потока на границах расчетной области определяется из условия:

$$q_{\text{гр}} = f(\tau). \quad (10)$$

Плотность теплового потока на внешней (огневой) границе стенки определяется из решения полевой модели.

Расчет по одномерному уравнению теплопроводности существенно завышает пределы огнестойкости конструкций, так как не учитывается отвод тепла от огневой поверхности конструкции в продольном направлении конструкции.

Исходные данные для расчета пределов огнестойкости строительных конструкций котельного отделения здания теплоэлектростанции представлены в таблице.

Рассматриваем пожароопасную ситуацию, которая характеризуется наиболее опасным воздействием с точки зрения нагрева несущих металлических конструкций: горение пролива мазута на площади 204 м² на отметке 0,000 в котельном отделении в осях 50–52/Г-Д.

Очаги пожара расположены исходя из возможности наиболее опасного воздействия (на рис. 2).

Наиболее опасному воздействию с точки зрения нагрева подвергаются:

- колонна КА1 с ПТМ $\delta_{\text{пр}} = 8,893$ мм, расположенная на оси 66/А;
- фермы L 60×5 с ПТМ $\delta_{\text{пр}} = 2,4$ мм, расположенные на отметке +23,950.

Теплофизические свойства стальных конструкций определялись по следующим характеристикам:

- плотность $r = 7800$ кг/м³;
- удельная теплоемкость $c = 470 + 0,21t + 5,0 \cdot 10^{-4}t^2$ Дж/(кг·К);
- коэффициент теплопроводности $\lambda = 58 - 0,042t$ Вт/(м·К),

где t — температура, °С.

Предельная критическая температура стальных конструкций соответствует используемой в нормативной документации и равна $T_{\text{кр}} = 500$ °С.

Основные характеристики используемых в помещениях материалов соответствуют используемым в базе пожарной нагрузки [11] — мазут:

- низшая рабочая теплота сгорания $Q_{\text{н}}^{\text{р}} = 42,25$ МДж/кг;
- удельная скорость выгорания $\psi_{\text{уд}} = 0,035$ кг/(м²·с);

Исходные данные для расчета пределов огнестойкости строительных конструкций котельного отделения здания теплоэлектростанции

Input data for calculating the fire resistance limits of building constructions in the boiler room of the building of a thermal power plant

Здание Building	ТЭЦ Power plant
Основные конструкции Main constructions	Стальные колонны, стальные стропильные фермы, балки покрытия, междуэтажные балки перекрытий Steel columns, steel roof trusses, flooring beams
Каркасно-рамная система Frame system	С жестким защемлением в фундамент с помощью анкерных болтов. В поперечном направлении — многэтажная двухпролетная этажерка, к которой шарнирно примыкают фермы машинного отделения и котельных, в продольном направлении — вертикальными крестовыми связями между колоннами Rigidly anchored into the foundation by anchor bolts. In the transverse direction — a multi-storey two-span bookcase, to which the trusses of the engine room and boiler rooms are hinged, in the longitudinal direction — by vertical cross ties between the columns
Колонны Columns	С шагом 6,5 м Step 6.5 m
Высота до низа стропильных ферм Height to the bottom of roof trusses	21,60 м 21.60 m

- потребление кислорода при горении $L_{O_2} = -3,163$;
- удельное дымовыделение $W_{уд} = 620,1$ Нп·м²/кг.
Концентрация кислорода, при которой прекращается горение, в расчетах принята равной $X_{O_2, \min} = 14\%$ (по массе).

Параметры атмосферного воздуха принимались следующими:

- температура 20 °С;
- давление $1,013 \cdot 10^5$ Па [1].

Результаты исследования и их обсуждение

«Для оценки динамики опасных факторов пожара, а также величин пределов огнестойкости строительных конструкций здания использовался специализированный программный комплекс.

На рис. 3–6 представлены характеристики температурного режима пожара и величины фактических пределов огнестойкости несущих металлических конструкций, полученные расчетным путем» [1].

Поля температур (в °С) и скорости (в м/с), оцениваемые в поперечных сечениях помещения, в котором возник пожар, представлены на рис. 2–5.

Координаты y и z направлены вдоль ширины и высоты помещения соответственно.

Максимальные и минимальные температуры колонны с ПТМ $\delta_{пр} = 8,893$ мм и ферм с ПТМ $\delta_{пр} = 2,4$ мм, расположенные на отметках +28,000 и +37,000, определяются из зависимостей, представленных на рис. 6.

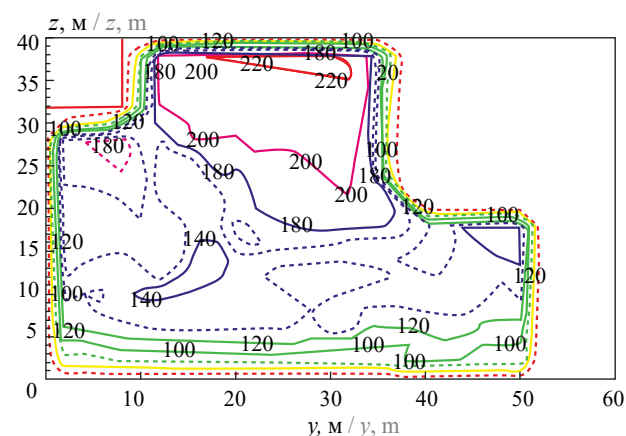


Рис. 2. Поля температур в поперечном сечении котельного отделения, проходящего через источник возгорания, через 5 мин от начала реального пожара

Fig. 2. Temperature fields in the cross section of the boiler room passing through the ignition source, 5 minutes after the start of a real fire

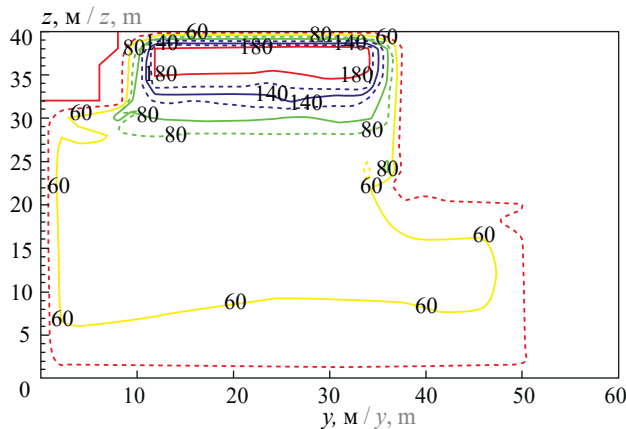


Рис. 3. Поля температур в поперечном сечении котельного отделения, проходящего через источник возгорания, через 15 мин от начала реального пожара

Fig. 3. Temperature fields in the cross section of the boiler room passing through the ignition source, 15 minutes after the start of a real fire

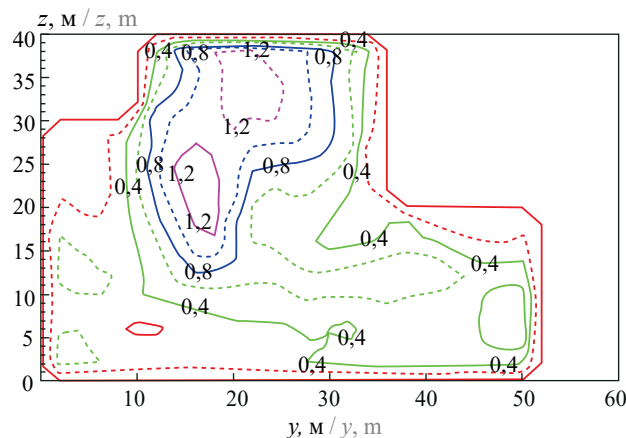


Рис. 4. Поля скоростей в поперечном сечении котельного отделения, проходящего через источник возгорания, через 5 мин от начала реального пожара

Fig. 4. Velocity fields in the cross section of the boiler room passing through the ignition source, 5 minutes after the start of a real fire

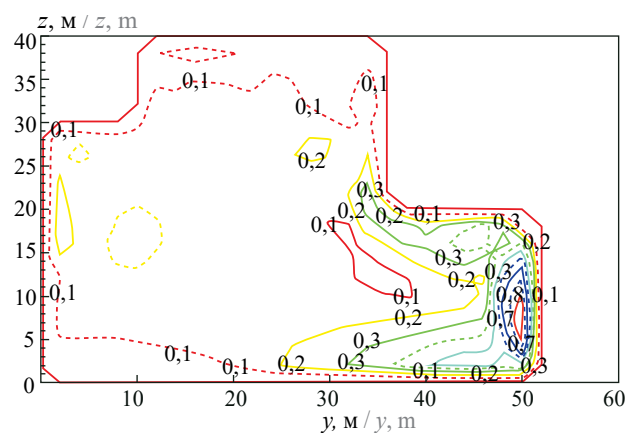


Рис. 5. Поля скоростей в поперечном сечении котельного отделения, проходящего через источник возгорания, через 15 мин от начала реального пожара

Fig. 5. Velocity fields in the cross section of the boiler room passing through the ignition source, 15 minutes after the start of a real fire

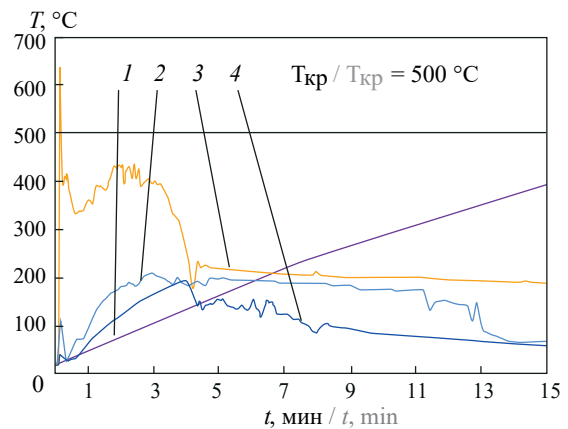


Рис. 6. Зависимости температур в контрольных точках возле стальных конструкций с различной проведенной толщиной металла и на их поверхности от времени при сценарии № 2 развития пожара: 1 — максимальная температура колонны с приведенной толщиной $\delta_{пр} = 8,893$ мм; 2 — максимальная температура газовой среды вблизи фермы с приведенной толщиной $\delta_{пр} = 2,4$ мм, расположенной на отметке +28,000; 3 — максимальная температура газовой среды вблизи фермы с приведенной толщиной $\delta_{пр} = 2,4$ мм, расположенной на отметке +37,000; 4 — максимальная температура газовой среды вблизи фермы с приведенной толщиной $\delta_{пр} = 2,4$ мм, расположенной на отметке +17,000

Fig. 6. Dependence of temperatures at control points near steel structures with different metal thicknesses and on their surface on time in scenario No. 2 of fire development: 1 — the maximum temperature of the column with the reduced thickness $\delta_{red} = 8.893$ mm; 2 — the maximum temperature of the gaseous environment near the farm with the reduced thickness $\delta_{red} = 2.4$ mm, located at +28,000; 3 — the maximum temperature of the gaseous environment near the farm with the reduced thickness $\delta_{red} = 2.4$ mm, located at +37,000; 4 — the maximum temperature of the gaseous medium near the farm with the reduced thickness $\delta_{red} = 2.4$ mm, located at +17,000

На основании проведенных расчетов видно, что спустя 15 мин от начала пожара не достигается критическая температура прогрева металлической конструкции, равная 500 °С. Исходя из этого можно заключить, что для металлических конструкций, расположенных в отделении котельной, проведение работ по огнезащитной обработке не требуется.

Выводы

На основе вышеописанных результатов по оценке предела огнестойкости металлических конструктивных элементов теплоэлектроцентралей можно сделать вывод: в случае возникновения пожара с наиболее опасным сценарием его развития пределы огнестойкости несущих конструктивных элементов выше R15, которые необходимы в соответствии с требованиями нормативных документов. Из этого следует, что огнезащита данных конструктивных элементов не требуется.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Пузач С.В., Еремина Т.Ю., Корольченко Д.А. Определение фактических пределов огнестойкости стальных конструкций с учетом реальной пожарной нагрузки // Пожаровзрывобезопасность/Fire and Explosion Safety. 2021. Т. 30. № 6. С. 61–72. DOI: 10.22227/0869-7493.2021.30.06.61-72
2. Скрипник И.Л., Бекишова Е.А. Анализ аварийных ситуаций на ТЭЦ и предложения по их снижению // Пожарная безопасность: современные вызовы. Проблемы и пути решения : мат. Междунар. науч.-практ. конф. Санкт-Петербург, 14 апреля 2020 г. СПб., 2020. С. 84–86. URL: <https://elibrary.ru/item.asp?id=44358546>
3. Скрипник И.Л., Воронин С.В. Анализ пожарной опасности технологических систем по показателям надежности // Надзорная деятельность и судебная экспертиза в системе безопасности. 2017. № 3. С. 33–37. URL: <https://elibrary.ru/item.asp?id=34903361>
4. Реценко А.Л., Дроздова Т.И. Анализ критического времени развития пожара и времени эвакуации работников ремонтного цеха автохозяйства МКУ «ТЭС» города Иркутска // Техносферная безопасность в XXI веке : мат. XI Всеросс. науч.-практ. конф. маг., асп. и мол. ученых. Иркутск, 1–3 декабря 2021 г. Иркутск, 2021. С. 189–195. URL: <https://elibrary.ru/item.asp?id=47349448>
5. Белов В.В., Пергаменчик Б.К. Прогнозирование ущерба от возможных чрезвычайных ситуаций с учетом пожара в главных корпусах ТЭС // Пожаровзрывобезопасность. 2016. Т. 25. № 8. С. 42–48. DOI 10.18322/PVB.2016.25.08.42-48
6. Bovsunovskii A.P., Chernousenko O.Yu., Shtefan E.V., Bashta D.A. Fatigue damage and failure of steam turbine rotors by torsional vibrations // Strength of Materials. 2010. Vol. 42. Issue 1. Pp. 108–113. DOI: 10.1007/s11223-010-9196-2
7. Шебеко Ю.Н., Зубань А.В., Шебеко А.Ю. Расчет фактического предела огнестойкости незащищенных стальных конструкций при различных температурных режимах пожара // Пожаровзрывобезопасность/Fire and Explosion Safety. 2019. Т. 28. № 6. С. 29–34. DOI: 10.18322/PVB.2019.28.06.29-34
8. Симонова М.А., Романов Н.Н., Пермяков А.А. Расчет температурных полей несущих металлических конструкций в условиях высокотемпературного воздействия для оценки огнестойкости // Вестник Международной академии холода. 2021. № 2. С. 88–97. DOI: 10.17586/1606-4313-2021-20-2-88-97
9. Coile R., Balomenos G., Pandey M.D., Caspee R. An unbiased method for probabilistic fire safety engineering, requiring a limited number of model evaluations // Fire Technology. 2017. Vol. 53. Issue 1. Pp. 1–40. DOI: 10.1007/s10694-017-0660-4
10. Салумяги И.В., Асламова В.С. Методы оценки пожарного риска // Транспортная инфраструктура Сибирского региона. 2017. Т. 1. С. 312–317.
11. Кошмаров Ю.А. Прогнозирование опасных факторов пожара в помещении : учеб. пособие. М. : Академия ГПС МВД России, 2000. 118 с.
12. Командышко В.О. Методы оценки пожарного риска // Студенческий. 2022. № 17-6 (187). С. 19–22.
13. Недрышкин О.В., Гравит М.В. Программные комплексы моделирования опасных факторов пожара // Пожарная безопасность. 2018. № 2. С. 38–46. URL: <https://elibrary.ru/item.asp?id=35102012>
14. Li S., Tao G., Zhang L. Fire risk assessment of high-rise buildings based on gray-FAHP mathematical model // Procedia Engineering. 2018. Vol. 211. Pp. 395–402. DOI: 10.1016/j.proeng.2017.12.028
15. McGrattan K., Forney G. Fire dynamics simulator. User's Guide. National Institute of Standards and Technology Special Publication 1019. 2005. P. 90.
16. Бедрина Е.А., Рекин А.С., Храпский С.Ф. Прогнозирование динамики тепломассообменных процессов при пожарах в типовых многоэтажных жилых зданиях // Динамика систем, механизмов и машин. 2019. Т. 7. № 3. С. 10–15. DOI: 10.25206/2310-9793-7-3-10-15
17. Храпский С.Ф., Бедрина Е.А. Динамика развития тепломассообменных процессов при пожарах в жилых многоквартирных зданиях и ее влияние на возможность безопасной эвакуации людей // Динамика систем, механизмов и машин. 2020. Т. 8. № 3. С. 124–131. DOI: 10.25206/2310-9793-8-3-124-131
18. Nimlyat P.S., Audu A.U., Ola-Adisa E.O., Gwatau D. An evaluation of fire safety measures in high-rise buildings in Nigeria // Sustainable Cities and Society. 2017. Vol. 35. Pp. 774–785. DOI: 10.1016/j.scs.2017.08.035
19. Qi D., Wang L., Zhao G. Froude-Stanton modeling of heat and mass transfer in large vertical spaces of highrise buildings // International Journal of Heat and Mass Transfer. 2017. Vol. 115. Pp. 706–716. DOI: 10.1016/j.ijheatmasstransfer.2017.08.030
20. Qi D., Wang L., Zmeureanu R. An analytical model of heat and mass transfer through non-adiabatic high-rise shafts during fires // International Journal of Heat and Mass Transfer. 2014. Vol. 72. Pp. 585–594. DOI: 10.1016/j.ijheatmasstransfer.2014.01.042
21. Ahn C.S., Bang B.H., Kim M.W., James S.C., Yarin A.L., Yoon S.S. Theoretical, numerical, and experimental investigation of smoke dynamics in high-rise buildings // International Journal of Heat and Mass Transfer. 2019. Vol. 135. Pp. 604–613.
22. Tan S., Moinuddin K. Systematic review of human and organizational risks for probabilistic risk analy-

- sis in high-rise buildings // Reliability Engineering & System Safety. 2019. Vol. 188. Pp. 233–250. DOI: 10.1016/j.res.2019.03.012
23. Пузач С.В. Методы расчета тепломассообмена при пожаре в помещении и их применение при решении практических задач пожаровзрывобезопасности. М. : Академия ГПС МЧС России, 2005. 336 с.
 24. Патанкар С. Численные методы решения задач теплообмена и динамики жидкости. М., 1984.
 25. Лойцянский Л.Г. Механика жидкости и газа. М. : Наука, 1987. 840 с.
 26. Smagorinsky J. General circulation experiments with the primitive equations // Monthly Weather Review. 1963. Vol. 91. Pp. 99–164. DOI: 10.1175/1520-0493(1963)091<0099:GCEWT-P>2.3.CO;2
 27. Кутателадзе С.С. Основы теории теплообмена. М. : Атомиздат, 1979. 416 с.

REFERENCES

1. Puzach S.V., Eremina T.Yu., Korolchenko D.A. The evaluation of actual fire resistance limits of steel structures exposed to real fire loading. *Pozharovzryvobezopasnost/Fire and Explosion Safety*. 2021; 30(6):61-72. (rus).
2. Skrypyuk I.L., Bekishova E.A. Analysis of emergency situations at chp and proposals for their reduction. Fire safety: modern challenges. *Problems and solutions : Materials of the International Scientific and Practical Conference, St. Petersburg, 14 April 2020*. St. Petersburg, 2020; 84-86. URL: <https://elibrary.ru/item.asp?id=44358546> (rus).
3. Skrypnik I.L., Voronin S.V. Analysis of the fire danger of technological systems by reliability indicators. *Scientific and analytical journal. Supervisory activities and forensic expertise in the security system*. 2017; 3:33-37. URL: <https://elibrary.ru/item.asp?id=34903361> (rus).
4. Reshchenko A.L., Drozdova T.I. Analysis of the critical time of the fire development and the evacuation time of the workers of the repair shop of the automobile farm MCU “TES” of Irkutsk. *Technosphere safety in XXI century: Materials of the XI All-Russian Scientific and Practical Conference of Undergraduates, Graduate Students and Young Scientists. Irkutsk, December 1–3, 2021*. Irkutsk, 2021; 189-195. URL: <https://elibrary.ru/item.asp?id=47349448> (rus).
5. Belov V.V., Pergamenschchik B.K. Forecasting of damage from possible emergencies, given the fire in the main building thermal power plants. *Pozharovzryvobezopasnost/Fire and Explosion Safety*. 2016; 25(8): 42-48. DOI: 10.18322/PVB.2016.25.08.42-48 (rus).
6. Bovsunovskii A.P., Chernousenko O.Yu., Shtefan E.V., Bashta D.A. Fatigue damage and failure of steam turbine rotors by torsional vibrations. *Strength of Materials*. 2010; 42(1):108-113. DOI: 10.1007/s11223-010-9196-2
7. Shebeko U.N., Zuban A.A., Shebeko A.Yu. An evaluation of an actual fire resistance limit of non-protected steel structures for different temperature regimes of fires. *Pozharovzryvobezopasnost/Fire and Explosion Safety*. 2019; 28(6):29-34. DOI: 10.18322/PVB.2019.28.06.29-34 (rus).
8. Simonova M.A., Romanov N.A., Permyakov A.A. Method of engineering calculation of the fire resistance limit for load-bearing metal structures. *Journal of International Academy of Refrigeration*. 2021; 2:88-97. DOI: 10.17586/1606-4313-2021-20-2-88-97 (rus).
9. Coile R., Balomenos G., Pandey M.D., Caspeele R. An unbiased method for probabilistic fire safety engineering, requiring a limited number of model evaluations. *Fire Technology*. 2017; 53(1):1-40. DOI: 10.1007/s10694-017-0660-4
10. Salumyagi I.V., Aslamova V.S. Methods of evaluation of the fire risk. *Transport Infrastructure of the Siberian Region*. 2017; 1:312-317. (rus).
11. Koshmarov U.A. *Prediction of indoor fire hazards*. Moscow, Fire Fighting Service of State Academy of Emercom of Russia, 2000; 118. (rus).
12. Komandysheko V.O. Methods of fire risk assessment. *Student*. 2022; 17-6(187):19-22. (rus).
13. Nedryshkin O.V., Gravit M.Q. Software complexes for modeling of dangerous fire factors. *Pozharnaya bezopasnost/Fire safety*. 2018; 2:38-46. URL: <https://elibrary.ru/item.asp?id=35102012> (rus).
14. Li S., Tao G., Zhang L. Fire Risk assessment of high-rise buildings based on gray-FAHP mathematical model. *Procedia Engineering*. 2018; 211:395-402. DOI: 10.1016/j.proeng.2017.12.028
15. McGrattan K., Forney G. *User's Guide. National Institute of Standards and Technology Special Publication 1019*. 2005; 90.
16. Bedrina E.A., Rekin A.S., Khrapsky S.F., Bokarev A.I., Denisova E.S. Heat-mass exchange processes dynamics forecasting in fires in typical multistorey apartment buildings. *Dynamics of Systems, Mechanisms and Machines*. 2019; 7(3):10-15. DOI: 10.25206/2310-9793-7-3-10-15 (rus).
17. Khrapsky S.F., Bedrina E.A. Heat-mass exchange processes dynamics in fires in multi-apartment buildings and its impact on safe people evacuation probability. *Dynamics of Systems, Mechanisms and Machines*. 2020; 8(3):124-131. DOI: 10.25206/2310-9793-8-3-124-131 (rus).
18. Nimlyat P.S., Audu A.U., Ola-Adisa E.O., Gwatau D. An evaluation of fire safety measures in high-rise buildings in Nigeria. *Sustainable Cities and Society*. 2017; 35:774-785. DOI: 10.1016/j.scs.2017.08.035
19. Qi D., Wang L., Zhao G. Froude-Stanton modeling of heat and mass transfer in large vertical spaces

- of highrise buildings. *International Journal of Heat and Mass Transfer*. 2017; 115:706-716.
20. Qi D., Wang L., Zmeureanu R. An analytical model of heat and mass transfer through non-adiabatic high-rise shafts during fires. *International Journal of Heat and Mass Transfer*. 2014; 72:585-594. DOI: 10.1016/j.ijheatmasstransfer.2014.01.042
 21. Ahn C.S., Bang B.H., Kim M.W., James S.C., Yarin A.L., Yoon S.S. Theoretical, numerical, and experimental investigation of smoke dynamics in high-rise buildings. *International Journal of Heat and Mass Transfer*. 2019; 135:604-613.
 22. Tan S., Moinuddin K. Systematic review of human and organizational risks for probabilistic risk analysis in high-rise buildings. *Reliability Engineering & System Safety*. 2019; 188:233-250. DOI: 10.1016/j.ress.2019.03.012
 23. Puzach S. *Methods of calculating heat and mass transfer in case of fire in the room and their application in solving practical problems of fire and explosion safety*. Moscow, Fire Fighting Service of State Academy of Emercom of Russia, 2005; 336. (rus).
 24. Patankar S. *Numerical methods of solving problems of heat transfer and fluid dynamics*. Moscow, 1984. (rus).
 25. Loitsyanskii L.G. *Mekhanika lizhdina i gaza*. Moscow, Nauka Publ., 1987; 840. (rus).
 26. Smagorinsky J. General circulation experiments with the primitive equations. *Monthly Weather Review*. 1963; 91:99-164 DOI: 10.1175/1520-0493(1963)091<0099:GCEWTP>2.3.CO;2
 27. Kutateladze S.S. *Fundamentals of the theory of heat transfer*. Moscow, Avtomirizdat Publ., 1979; 416. (rus).

Поступила 26.08.2022, после доработки 20.09.2022;
принята к публикации 30.09.2022

Received August 26, 2022; Received in revised form September 20, 2022;
Accepted September 30, 2022

Информация об авторах

ПУЗАЧ Сергей Викторович, д-р техн. наук, профессор, заслуженный деятель науки РФ, профессор кафедры комплексной безопасности в строительстве, Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет, Россия, 129337, г. Москва, Ярославское шоссе, 26; РИНЦ ID: 18265; ResearcherID: U-2907-2019; Scopus Author ID: 7003537835; ORCID: 0000-0001-7234-1339; e-mail: puzachsv@mail.ru

ЕРЕМИНА Татьяна Юрьевна, д-р техн. наук, профессор, профессор кафедры комплексной безопасности в строительстве, Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет, Россия, 129337, г. Москва, Ярославское шоссе, 26; РИНЦ ID: 274777; Scopus Author ID: 56893573700; ORCID: 0000-0003-1427-606X; e-mail: main@stopfire.ru

ПОРТНОВ Федор Александрович, к-т техн. наук, доцент кафедры комплексной безопасности в строительстве, Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет, Россия, 129337, г. Москва, Ярославское шоссе, 26; РИНЦ ID: 1134480; Scopus Author ID: 57192372795; ORCID: 0000-0001-7409-0844; e-mail: f.portnov@ikbs-mgsu.ru

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

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Information about the authors

Sergey V. PUZACH, Dr. Sci. (Eng.), Professor, Honoured Scientist of the Russian Federation, Professor of Department of Integrated Safety in Civil Engineering, National Research Moscow State University of Civil Engineering, Yaroslavl'skoe Shosse, 26, Moscow, 129337, Russian Federation; ID RISC: 18265; ResearcherID: U-2907-2019; Scopus Author ID: 7003537835; ORCID: 0000-0001-7234-1339; e-mail: puzachsv@mail.ru

Tatyana Yu. EREMINA, Dr. Sci. (Eng.), Professor, Professor of Department of Integrated Safety in Civil Engineering, National Research Moscow State University of Civil Engineering, Moscow, Russian Federation; ID RISC: 274777; Scopus Author ID: 56893573700; ORCID: 0000-0003-1427-606X; e-mail: main@stopfire.ru

Fedor A. PORTNOV, Cand. Sci. (Eng.), Associated Professor of Department of Integrated Safety in Civil Engineering, National Research Moscow State University of Civil Engineering, Yaroslavl'skoe Shosse, 26, Moscow, 129337, Russian Federation; ID RISC: 1134480; Scopus Author ID: 57192372795; ORCID: 0000-0001-7409-0844; e-mail: f.portnov@ikbs-mgsu.ru

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

The authors declare that there is no conflict of interest.

ПОЖАРОВЗРЫВБЕЗОПАСНОСТЬ/FIRE AND EXPLOSION SAFETY. 2022. Т. 31. № 5. С. 43–53
POZHAROVZRYVOBEZOPASNOST/FIRE AND EXPLOSION SAFETY. 2022; 31(5):43-53

НАУЧНАЯ СТАТЬЯ/RESEARCH PAPER

УДК 614.844.2

<https://doi.org/10.22227/0869-7493.2022.31.05.43-53>

Особенности реализации автоматических установок сдерживания пожара

Леонид Тимофеевич Танклевский^{1, 2}, Александр Алексеевич Таранцев^{2, 3} ✉, Александр Иванович Бондар⁴, Иван Дмитриевич Балабанов¹

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

² Санкт-Петербургский университет Государственной противопожарной службы Министерства Российской Федерации по делам гражданской обороны, чрезвычайным ситуациям и ликвидации последствий стихийных бедствий, г. Санкт-Петербург, Россия

³ Институт проблем транспорта им. Н.С. Соломенко Российской академии наук, г. Санкт-Петербург, Россия

⁴ Департамент образовательной и научно-технической деятельности Министерства Российской Федерации по делам гражданской обороны, чрезвычайным ситуациям и ликвидации последствий стихийных бедствий, г. Москва, Россия

АННОТАЦИЯ

Введение. В статье уточнены области применения автоматических установок сдерживания пожара и подлежащие их защите объекты, обоснованы основные принципы их разработки. С учетом теплового нагружения конструкций предложены рациональные гидравлические схемы размещения оросителей водяных автоматических установок сдерживания пожара для помещений большой и малой площади.

Цель и задачи. Разработка рекомендаций по применению автоматических установок сдерживания пожара и подлежащие их защите объекты.

Материалы и методы. В процессе работы проводились теоретические и экспериментальные исследования развития пожара при подаче воды установками с различной интенсивностью.

Результаты и их обсуждение. В результате исследования впервые были разработаны общетехнические требования к водяным автоматическим установкам сдерживания пожара и методы их испытаний.

Выводы. Разработана первая редакция указанного ГОСТ «Установки сдерживания пожара водяные автоматические. Общие технические требования. Методы испытаний», разослана на отзыв причастным организациям, в результате чего с учетом их мнений и предложений создана согласованная редакция ГОСТ.

Ключевые слова: автоматическое водяное пожаротушение; огнетушащие вещества; гидравлические схемы; опасные факторы пожара; нормативный документ

Для цитирования: Танклевский Л.Т., Таранцев А.А., Бондар А.И., Балабанов И.Д. Особенности реализации автоматических установок сдерживания пожара // Пожаровзрывобезопасность/Fire and Explosion Safety. 2022. Т. 31. № 5. С. 43–53. DOI: 10.22227/0869-7493.2022.31.05.43-53

✉ Александр Алексеевич Таранцев, e-mail: t__54@mail.ru

Aspects of implementation of automatic fire containment systems

Leonid T. Tanklevskiy^{1, 2}, Alexander A. Tarantsev^{2, 3} ✉, Alexander I. Bondar⁴, Ivan D. Balabanov¹

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

² Saint-Petersburg University of State Fire Service of the Ministry of the Russian Federation for Civil Defense, Emergencies and Elimination on Consequences of Natural Disasters, Saint Petersburg, Russian Federation

³ Solomenko Institute of Transport Problems of the Russian Academy of Sciences, Saint Petersburg, Russian Federation

⁴ Department of Educational and Scientific and Technical Activities of the Ministry of the Russian Federation for Civil Defense, Emergencies and Elimination on Consequences of Natural Disasters, Moscow, Russian Federation

ABSTRACT

Introduction. The authors specify the areas of application of automatic fire-prevention systems and the objects that they protect; they also substantiate the main principles of their design and development. Rational hydraulic sprinkler arrangement patterns are designed for automatic water fire-containment systems to be installed in large and small premises, depending on the thermal loading of structures.

Goal and objectives. Development of recommendations on the use of automatic fire-containment systems and the objects that they protect.

Materials and methods. Fire development patterns were subjected to theoretical and experimental research conducted during variable intensity water supply.

Results and their discussion. As a result of this research, general engineering requirements for automatic water fire-containment systems and their testing methods were first developed.

Conclusions. The first edition of GOST (All-Russian State Standard) "Automatic water fire-containment systems. General engineering requirements. Testing methods" were addressed to the organizations concerned with this area of knowledge; their opinions and suggestions were contributed to another approved edition of this GOST (All-Russian State Standard).

Keywords: automatic water firefighting; extinguishing agents; hydraulic circuits; fire hazards; regulatory document

For citation: Tanklevskiy L.T., Tarantsev A.A., Bondar A.I., Balabanov I.D. Aspects of implementation of automatic fire containment systems. *Pozharovzryvbezopasnost/Fire and Explosion Safety*. 2022; 31(5):43-53. DOI: 10.22227/0869-7493.2022.31.05.43-53 (rus).

✉ Alexander Alekseevich Tarantsev, e-mail: t__54@mail.ru

Введение

Важную роль в решении задач обеспечения пожарной безопасности объектов различного назначения играют установки пожарной автоматики, призванные обеспечить оперативное обнаружение возгорания и его эффективную ликвидацию на ранней стадии развития. Для решения этих задач широко применяются водяные автоматические установки пожаротушения (АУП).

Тем не менее можно выделить группу защищаемых объектов, в помещениях которых целесообразность применения классических АУП оказывается неочевидной [1, 2]. Это, например, объекты:

- исторического и культурного наследия, выставочные комплексы, а также офисы и больницы, где ущерб от воздействия жидких огнетушащих веществ (ОТВ) может оказаться сопоставимым или даже превышать ущерб от первичных опасных факторов пожара (ОФП) — пламени, повышенной температуры и др. [3].

Кроме того, можно выделить другую группу объектов, в которых использование полноценной АУП может оказаться нецелесообразным, например объекты:

- с низкой пожарной нагрузкой и высокой степенью огнестойкости ограждающих конструкций;
- на которых организована добровольная пожарная дружина или которые расположены вблизи пожарной части, когда обеспечивается оперативное прибытие пожарных расчетов и подача стволов на тушение;
- объекты, на которых значительная часть помещений с низкой пожарной опасностью оборудуется АУП только вследствие требования п. 4.5 свода правил СП 486: «Если площадь помещений, подлежащих оборудованию АУП, составляет 40 % и более от общей площади этажей здания, сооружения, следует предусматривать оборудование здания, сооружения в целом АУП...».

Введение в Федеральный закон № 123 понятия «Автоматические установки сдерживания пожара» (АУСП) позволяет в ряде случаев отказаться от использования АУП и сформировать новые подходы к автоматической пожарной защите вышеперечисленных объектов.

Материалы и методы

Следует отметить, что содержащаяся в статье 117 ФЗ № 123 информация об АУСП изложена крайне нечетко, что определило многолетнее игнорирование соответствующего понятия и отсутствие их практической реализации. В частности, формулировка п. 1, из которой следует, что АУСП «...должны обеспечивать снижение скорости увеличения площади пожара и образования его ОФП», порождает множество вопросов. Какова цель «снижения скорости увеличения площади пожара»? «Снижение скорости увеличения площади пожара» до какой величины является приемлемым? Является ли локализация (снижение до нуля скорости увеличения площади пожара) реализацией функции сдерживания? Применительно к ОФП, статья 117 ФЗ № 123 требует снижения скорости их образования или так же, как и в случае площади пожара, снижения скорости увеличения образования ОФП? Как оценить скорость образования ОФП?

Содержащаяся в п. 2 статьи 117 ФЗ № 123 рекомендация, определяющая сферу применения АУСП в «помещениях, в которых применение других автоматических установок пожаротушения нецелесообразно или технически невозможно», также оставляет нераскрытыми ряд вопросов. Как определить целесообразность применения АУП? Как быть, если вывод о нецелесообразности АУП противоречит требованиям о ее необходимости, содержащимся в соответствующем своде правил СП 486? Что конкретно понимается под технической невозможностью? Имеется ли в виду чрезмерная сложность, высокая стоимость реализации? Или что-то иное?

Требование п. 3 статьи 117: «Вид огнетушащих веществ, используемых в автоматических установках сдерживания пожара, определяется особенностями объекта защиты, вида и размещения пожарной нагрузки», на первый взгляд, выглядит очевидным, но только если не задумываться о том, как, например, газовые, порошковые или аэрозольные установки обеспечат не тушение, а «снижение скорости увеличения площади пожара и образования ОФП». Иными словами, единственный вид ОТВ, пригодный для использования в АУСП, — это вода (или вода с какими-либо добавками).

Для того чтобы, сохраняя суть понятия АУСП, устранить отмеченную нечеткость формулировок, был разработан проект ГОСТ Р «Установки сдерживания пожара водяные автоматические. Общие технические требования. Методы испытаний». В частности, определено, что основное требование к АУСП заключается в ограничении площади пожара до начала тушения первыми прибывшими пожарными подразделениями в размерах, при которых пожар будет гарантированно ими потушен без повышения номера (ранга пожара) и привлечения дополнительных сил и средств. Для этого, согласно положениям пожарной тактики [3, 4], должно выполняться условие:

$$S_c < S_t, \quad (1)$$

а величина S_t может быть определена по выражению:

$$S_t = \frac{nq}{I}, \quad (2)$$

где n — число стволов, подаваемых на тушение;

q — расход ОТВ (воды) из ствола, л/с;

I — требуемая интенсивность его подачи.

Например, если известно, что первое прибывшее пожарное подразделение может подать два ($n = 2$) ствола «Б» ($q = 3,7$ л/с) на тушение пожара в административном здании 5-й степени огнестойкости ($I = 0,15$ л/(м² · с)), согласно (2): $S_t = 2 \cdot 3,7/0,15 = 49,33$ м². Из этого следует, что оросители АУСП должны быть расположены так, чтобы сдерживать пожар на площади, не превышающей 49,33 м².

Выполнение условия (1), помимо высокой оперативности прибытия пожарных подразделений, может быть достигнуто как путем ограждения площади защищаемого помещения или дверных (оконных) проемов спринклерами АУСП, так и предварительным смачиванием пожарной нагрузки на возможном пути распространения пожара.

Оценка теплового нагружения строительных конструкций помещения

Поскольку первые прибывшие пожарные подразделения могут не сразу подать стволы на туше-

ние по причине проведения разведки, боевого развертывания и спасения людей, следует учитывать, что пожар может развиваться до защищаемой площади:

$$S_c = \pi(vt)^2, \quad (3)$$

где v — скорость распространения пламени, м/с,

t — время, с.

Тогда температура T у перекрытия над очагом пожара, согласно [5], будет равна:

$$T = T_0 + 16,9 \frac{(S_c Q)^{2/3}}{H^{5/3}}, \quad (4)$$

где T_0 — начальная температура в помещении, °С;

Q — удельная тепловая мощность пожарной нагрузки, кВт/м²;

H — высота помещения, м.

Например, при $T_0 = 20$ °С, $Q = 210$ кВт/м², $H = 5$ м и $S_c = 49$ м² из (4) получаем:

$$T = 20 + 16,9 \frac{(49 \cdot 210)^{2/3}}{5^{5/3}} = 566,9 \text{ °С},$$

что свидетельствует о значительном тепловом нагружении перекрытия. Для некоторых защищаемых помещений с ограниченным пределом огнестойкости ограждающих конструкций это может потребовать такой расстановки оросителей АУСП [6–10], чтобы пожар был сдержан на меньшей площади.

Схемы размещения оросителей

Наиболее рациональной схемой расположения оросителей АУСП для помещений больших площадей может быть такая, которая разделяет защищаемую площадь на условные квадратные зоны, чтобы в пределах любой из них пожар был сдержан дренчерными оросителями или вскрывшимися спринклерными оросителями с управляемым запуском до начала тушения первыми прибывшими пожарными подразделениями. Реализовать такую схему расположения оросителей можно при выполнении условия (1). Пример секторной схемы размещения оросителей АУСП в помещении с управляемой активацией ветвей оросителей при различных площадях сдерживания пожара указан на рис. 1, обозначенных штриховкой (в левой верхней части — 117 м², в правой верхней части — 73,6 м², в правой нижней части — 49 м²). Благодаря управляемому запуску оросителей [11] можно существенно снизить расход воды, а также контролировать работу системы сдерживания пожара. Формирование сдерживающих зон происходит за счет площадей орошения.

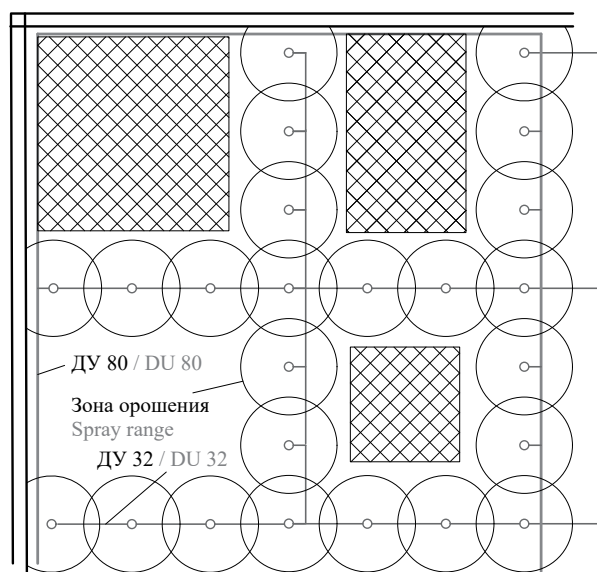


Рис. 1. Секторная схема размещения оросителей АУСП в помещении с управляемой активацией ветвей оросителей при различных площадях сдерживания пожара

Fig. 1. The sectoral pattern of arrangement of fire extinguishing sprinklers in a room featuring controlled activation of branches of sprinklers for cases of different fire containment areas

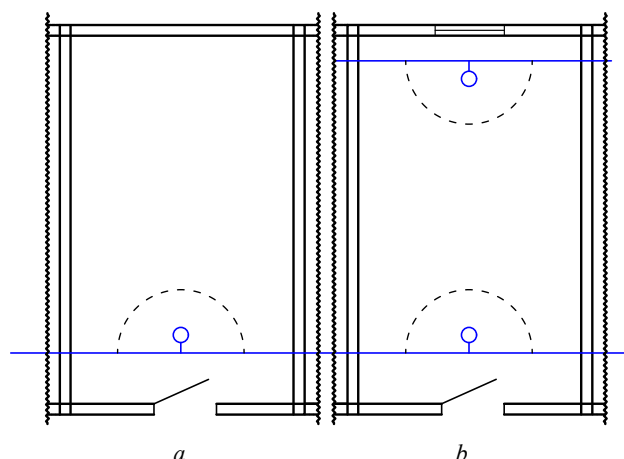


Рис. 2. Схемы размещения оросителей АУСП в помещениях с дверью и окном

Fig. 2. The pattern of arrangement of fire extinguishing sprinklers in a room that has a door and a window

Например, на рис. 1 приведены схемы размещения оросителей АУСП с шагом 3,5 м при различных вариантах площадей сдерживания пожара (предполагается, что огнетушащая интенсивность оросителей АУСП достаточна для сдерживания пожара на такой площади). Данную площадь способно потушить первое прибывшее подразделение, поэтому схема размещения оросителей была сформирована так, чтобы сектора формировались вокруг таких площадей.

При наличии помещений небольшой площади с незначительной пожарной нагрузкой для сдерживания в них пожара целесообразно так размещать

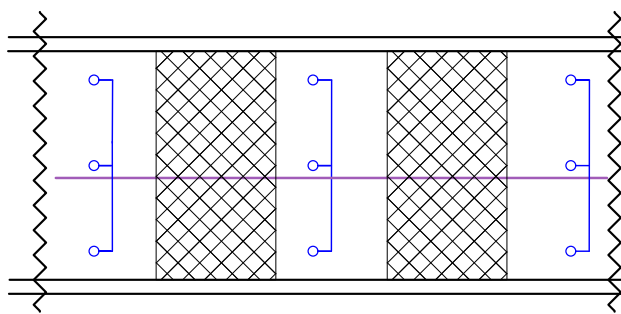


Рис. 3. Схема размещения оросителей АУСП при сдерживании пожара в помещениях протяженной формы посредством разделения помещения на зоны

Fig. 3. The pattern of arrangement of fire extinguishing sprinklers in case of fire containment in long rooms divided into zones

оросители АУСП, чтобы они защищали или только дверь (рис. 2, а), или и дверь, и окно (рис. 2, б), если фасад дома не должен быть поврежден ОФП.

При протяженной форме защищаемого помещения его целесообразно разделять оросителями АУСП на зоны (рис. 3) (штриховкой обозначены площади пожара, каждую из которых способно потушить пожарное подразделение), в пределах которых выполняется условие (1).

Результаты и их обсуждение

Для подтверждения эффекта сдерживания пожара смачиванием пожарной нагрузки был проведен ряд экспериментов на базе НИИ перспективных исследований и инновационных технологий в области безопасности жизнедеятельности (НИИПИиИТвОБЖ) в составе Санкт-Петербургского университета ГПС МЧС России. В ходе испытаний был разработан модельный очаг (рис. 4), состоящий из четырех модельных очагов 2А, где четвертый отделен от трех экраном для свободного горения. Задача оставшихся трех была в рассмотрении эффекта сдерживания нормативной тушащей интенсивностью. Установлен факт резкого замедления скорости распространения на 1 м горения за счет смачивания водой его части, что подтверждает эффективность сдерживания пожара.

Во втором испытании рассматривался эффект сдерживания ОФП для безопасной эвакуации людей и использование системы АУСП. Для испытаний использовался модельный стенд с помещениями, имитирующими офис и коридор (рис. 5).

В данном эксперименте был использован модельный очаг 0,1А. Для замера уровней ОФП были задействованы газоанализатор МАГ-6 П и регистратор термопар «Интеграф» (рис. 6).

Поскольку наибольшую опасность при эвакуации людей при пожаре могут представлять окись

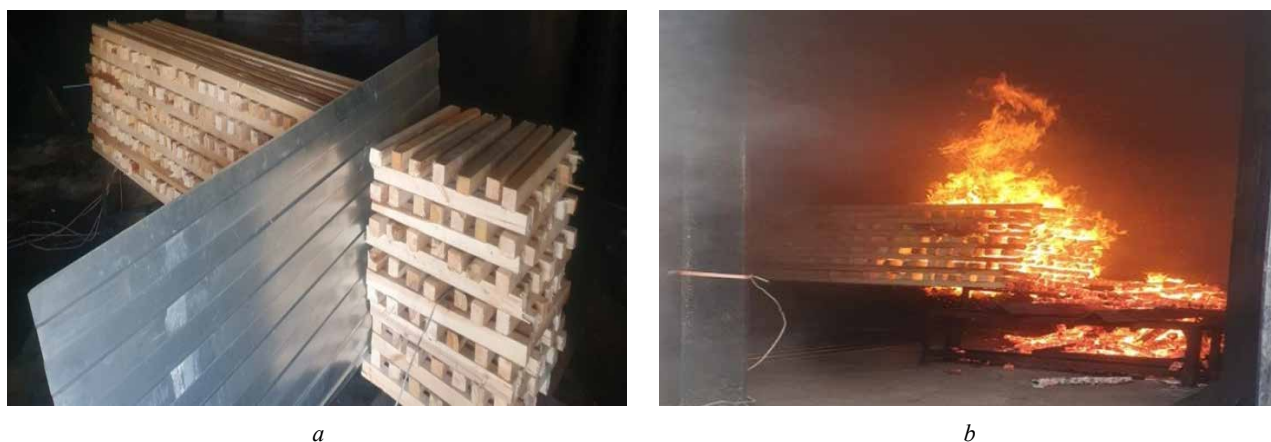


Рис. 4. Огневой эксперимент на модельном очаге пожара (а), разделенном на смоченную (слева) и сухую (справа) зоны и процесс горения (b)

Fig. 4. The fire experiment conducted using a model fire seat (a), divided into wet (left) and dry (right) zones, and the combustion process (b)

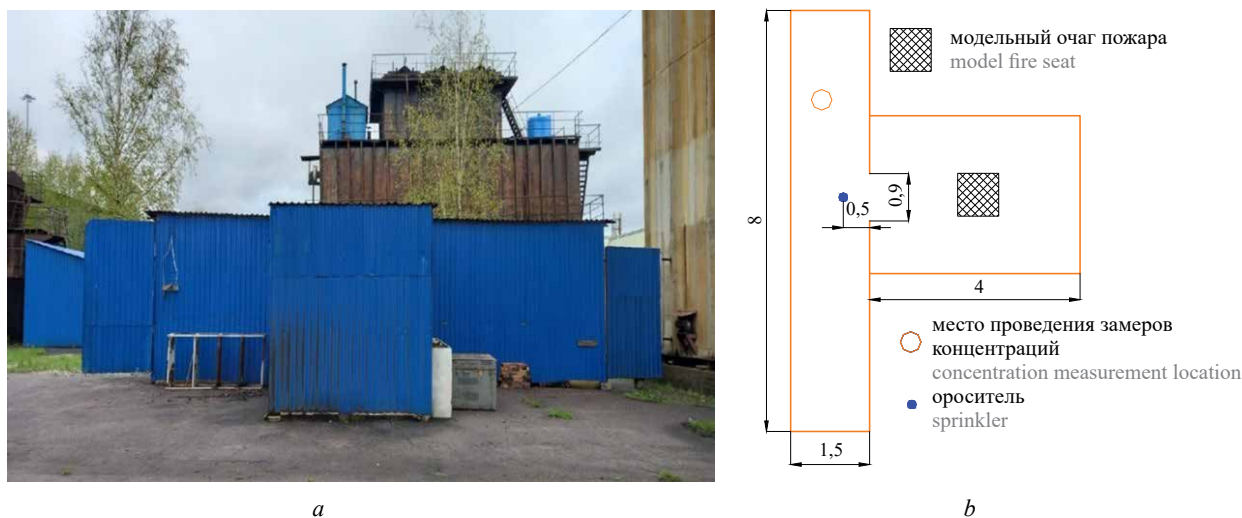


Рис. 5. Стенд для проведения натурных испытаний (а) и схема размещения оросителя и модельного очага (b)

Fig. 5. A test bench for full-scale tests (a) and the layout of the sprinkler and the model fire seat (b)



Рис. 6. Модельный очаг (а); газоанализатор (b)

Fig. 6. A model fire seat (a); a gas analyzer (b)

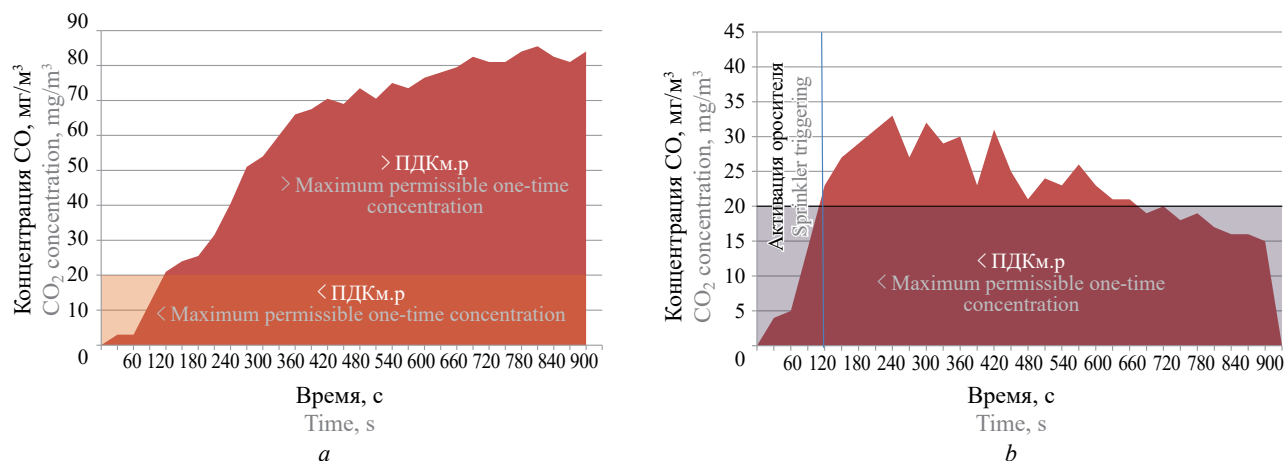


Рис. 7. Динамика концентрации окиси углерода при свободном развитии пожара (а) и при срабатывании АУСП (б)

Fig. 7. A change in the carbon monoxide concentration for the case of a freely fire (a) and when the fire extinguishing system is triggered (b)

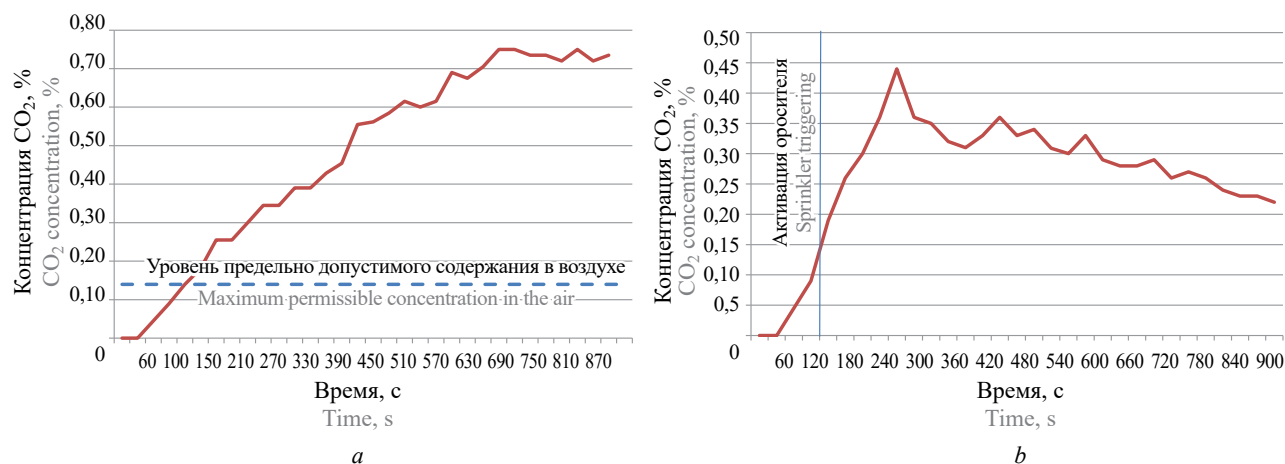


Рис. 8. Динамика концентрации двуокиси углерода при свободном развитии пожара (а) и при срабатывании АУСП (б)

Fig. 8. A change in the carbon dioxide concentration for a freely developing fire (a) and for the case of an automatically triggered fire extinguishing system (b)

и двуокись углерода (CO и CO_2), в ходе экспериментов измерялась их концентрация как при свободном развитии пожара, так и при срабатывании оросителей АУСП. На рис. 7, а представлена динамика концентрации CO при свободном развитии пожара, на рис. 7, б — при срабатывании АУСП на 3-й минуте пожара. На рис. 8 аналогично представлена динамика концентрации CO_2 при свободном развитии пожара и при срабатывании АУСП. Как следует из рис. 7 и 8, оборудование помещений АУСП позволяет сдерживать рост ОФП и обеспечить тем самым эвакуацию людей при пожаре.

Также в ходе проведения испытаний был замечен эффект сдерживания задымления в пределах помещения, что позволило обосновать эффективность вышеприведенных схем размещения оросителей АУСП. При этом АУСП позволяет не только сдерживать ОФП, но и не препятство-

вать эвакуации ввиду ограниченности расхода ОТВ из оросителей.

Предложения по применению АУСП

Как определено в своде правил СП 485, решение о применении в защищаемых помещениях автоматической пожарной сигнализации (АПС) или АУП определяется некоторым условным критерием S_k — чаще всего это такой показатель, как защищаемая площадь S (но в некоторых случаях, согласно п. 8.2 табл. 1 СП 486, это высота здания или, согласно п. 4 табл. 2 СП 486, объем кабельного сооружения или др.). Примеры величин S_k для наземных автостоянок закрытого типа и зданий предприятий торговли приведены в таблице.

Если соблюдается условие $S < S_k$, то допустимо использовать только АПС, а при $S \geq S_k$ — АУП. Учитывая значительную разницу в стоимости АПС и АУП, может возникать некоторый пара-

Примеры величин критерия S_k для некоторых защищаемых объектов в соответствии с табл. 1 (п.п. 4.1.2 и 12.1) [10]
 Examples of values of criterion S_k for some protected objects according to Table 1 (sections 4.1.2 and 12.1) [10]

Наземные автостоянки закрытого типа, $N_3 = 1$ Closed-type surface parking lots, $N_F = 1$			Одноэтажные здания предприятий торговли Single-story commercial buildings			
СтО DFR	ККПО CSFH	Критерий S_k — общая площадь здания (пожарного отсека) Criterion S_k is the total area of a building (the fire compartment)	N_3 N_F	Размещение торгового зала Arrangement of retail space	Критерий S_k — площадь Criterion S_k is the area	
			1	в цокольном, заглублен- ном более чем на 0,5 м, или подвальном этажах in the basement, located at the distance of 0.5 m below the ground surface, or in the cellar	торгового зала — 200 м ² The sales area is 200 m ²	
I, II, III	C0	7000 м ² / м ²	1	в цокольном, заглублен- ном более чем на 0,5 м, или подвальном этажах in the basement, located at the distance of 0.5 m below the ground surface, or in the cellar	торгового зала — 200 м ² The sales area is 200 m ²	
	C1	3600 м ² / м ²				
IV	C0	2000 м ² / м ²		2	в наземной части здания in the above-ground part of the building	здания — 3500 м ² The building — 3,500 м ²
	C1					
	C2, C3	1000 м ² / м ²	2	в наземной части здания in the above-ground part of the building	здания — 4000 м ² The building — 4,000 м ²	

Примечание: СтО — степень огнестойкости; ККПО — класс конструктивной пожарной опасности; N_3 — количество этажей.
 Note: DFR is the degree of fire resistance; CSFH is the class of structural fire hazard; N_F is the number of floors.

докс. Например, стоит увеличить площадь торгового зала в цокольном этаже, заглубленном более чем на 0,5 м, или подвальном этаже на 1 м² с 200 до 201 м², то даже при незначительной пожарной нагрузке приходится применять дорогостоящую АУП. А при искусственном снижении площади S с 200 м² до 199 м², даже при увеличении пожарной нагрузки можно вместо АУП применять менее дорогостоящую АПС.

Выход из такой ситуации может заключаться в применении АУСП. Введя условный коэффициент $0 < k < 1$, определяемый, например, экспертными методами, можно ось показателя S разделить на 3 диапазона: первый — $0 < S < S_k k$; второй — $S_k k \leq S \leq (2 - k)S_k$; третий — $S > (2 - k)S_k$. Если показатель S находится в 1-м диапазоне, следует применять АПС; если во 2-м — следует применять АУСП; если в 3-м — АУП.

Например, для одноэтажной наземной автостоянки, находящейся в здании закрытого типа IV степени огнестойкости и класса конструктивной пожарной опасности C2, полагая $k = 0,8$, при $S < 800$ м² можно ограничиться оборудованием АПС, при 800 м² $\leq S \leq 1200$ м² целесообразно использовать АУСП, а при $S > 1200$ м² автостоянку необходимо защищать АУП.

С применением АУСП может быть устранен и другой парадокс, заключающийся в требовании п. 4.5: «Если площадь помещений, подлежащих оборудованию АУП ($S_{АУП}$), составляет 40 % и более от общей площади этажей здания, сооружения,

следует предусматривать оборудование здания, сооружения в целом АУП...», что для многих объектов экономически нецелесообразно. Тогда эту площадь следует защищать АУСП.

Это может позволить оптимизировать противопожарную защиту многих объектов с использованием АУСП.

Выводы

Таким образом, в статье рассмотрены вопросы размещения оросителей АУСП в различных типах защищаемых помещений — большой и малой площади, вытянутой формы и др. Рассмотрены различные модели пожара — интегральная, зонная, полевая и пожарно-тактическая, позволяющие оценить динамику ОФП в помещении и возможность применения задач АУСП. Также аналогичным вопросам посвящены работы отечественных и зарубежных исследователей [11–32].

Сформулированы основные требования к АУСП и показана необходимость создания специального нормативного документа — ГОСТ «Установки сдерживания пожара водяные автоматические. Общие технические требования. Методы испытаний». Требования к функциональному назначению установок АУСП:

- снижение скорости увеличения площади распространения пожара и мощности тепловыделения пожара;
- ограничения площади пожара.

Также показана возможность оптимизации противопожарной защиты объектов с применением АУСП. В дальнейшем планируется для реализации схем размещения оросителей АУСП рассмотреть вопросы активации оросителей, а также разработать проект нормативного документа в части требований к проектированию АУСП. Для развития данной тема-

тики было предложено внести изменения в СП 485 и 486. В данные нормативные документы необходимо добавление систем АУСП для разграничения существующих систем АПС и АУП, что позволит существенно уменьшить опасность от возникшего пожара на объекте, когда нормативный стандарт требует установку только систем АПС.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Бондар А.И., Мешалкин Е.А., Танклевский Л.Т., Таранцев А.А., Цариченко С.Г. Об особенностях применения автоматических установок сдерживания пожара // Пожаровзрывобезопасность/Fire and Explosion Safety. 2019. Т. 28. № 6. С. 71–79. DOI: 10.18322/PVB.2019.28.06.71-79
2. Зыбина О.А., Танклевский Л.Т., Таранцев А.А. О проблеме разработки автоматических установок сдерживания пожара // Проблемы управления рисками в техносфере. 2019. № 4 (52). С. 67–72. URL: <https://elibrary.ru/item.asp?id=41807858>
3. Повзик Я.С. Пожарная тактика. М. : ЗАО «Спецтехника», 2004. 416 с.
4. Терещев В.В., Подгруппин А.В. Пожарная тактика. Основы тушения пожара. Екатеринбург : Калан, 2008. 512 с.
5. Alpert R.L. Ceiling jet flows // SFPE Handbook of Fire Protection Engineering. 3rd ed. NFPA, 2002. Pp. 2-18–2-31. DOI: 10.1007/978-1-4939-2565-0_14
6. Собратьев С.В. Установки пожаротушения автоматические : справочник. 3-е изд. с изм. М. : ЗАО «Спецтехника», 2003. 400 с.
7. Сафронов В.В., Аксенова Е.В. Выбор и расчет параметров установок пожаротушения и сигнализации. Орел : ОрлГТУ, 2004. 57 с.
8. Таранцев А.А., Танклевский Л.Т., Снегирев А.Ю., Цой А.С., Копылов С.Н., Мешман Л.М. Оценка эффективности спринклерной установки пожаротушения // Пожарная безопасность. 2015. № 1. С. 72–79. URL: <https://elibrary.ru/item.asp?id=23092679>
9. Илюшов Н.Я. Автоматические установки пожаротушения. Новосибирск : Изд-во НГТУ, 2016. 134 с.
10. Воронков О.Ю. Расчет, монтаж и эксплуатация автоматических установок пожаротушения : учеб. пос. Омск : Изд-во ОмГТУ, 2016. 140 с.
11. Бабинов И.А., Танклевский А.Л., Таранцев А.А. О способе определения группы принудительно активируемых оросителей при возникновении пожара в помещении // Проблемы управления рисками в техносфере. 2019. № 3 (51). С. 34–41. URL: <https://elibrary.ru/item.asp?id=41212640>
12. Xin Yibing, Burchesky K., de Vries J., Magistrale H., Zhou X., D'Aniello S. SMART sprinkler protection for highly challenging fires — Part 1: System design and function evaluation. Fire Technology. 2016. Vol. 53. Issue 5. Pp. 1847–1884. DOI: 10.1007/s10694-017-0662-2
13. Груданова О.В., Таранцев А.А., Королева Л.А. Об экономической оценке двух путей модернизации автоматических установок пожаротушения // Проблемы управления рисками в техносфере. 2007. № 1. С. 38–42.
14. Мешман Л.М., Цариченко С.Г., Былинкин В.А., Алешин В.В., Губин Р.Ю. Проектирование водяных и пенных автоматических установок пожаротушения / под общ. ред. Н.П. Копылова. М. : ВНИИПО МЧС РФ, 2002. 413 с.
15. Drysdale D. The pre-flashover compartment fire // An introduction to fire dynamics. 3rd ed. 2011. Pp. 349–386. DOI: 10.1002/9781119975465.ch9
16. Williams F.A. Mechanisms of fire spread // Symposium (International) on Combustion. 1977. Vol. 16. Issue 1. Pp. 1281–1294.
17. De Ris J.N. Spread of a laminar diffusion flame // Symposium (International) on Combustion. 1969. Vol. 12. Issue 1. Pp. 241–252.
18. Fernandez-Pello A.C. A theoretical model for the upward laminar spread of flames over vertical fuel surfaces // Combustion Flame. 1978. Vol. 31. Pp. 135–148.
19. Delichatsios M.A. Surface extinction of flames on solids: some interesting results // Proceedings of the Combustion Institute. 2007. Vol. 31. Issue 2. Pp. 2749–2756. DOI: 10.1016/j.proci.2006.08.032
20. Frey A.E., Tien J.S. Near-limit flame spread over paper samples // Combustion Flame. 1976. Vol. 26. Issue 1. Pp. 257–267.
21. Quintiere J.G. The effects of angular orientation on flame spread over thin materials // Fire Safety Journal. 2001. Vol. 36. Issue 3. Pp. 291–312.
22. Kobayashi Y., Terashima K., Oiwa R., Tokoro M., Takahashi S. Opposed-flow flame spread over carbon fiber reinforced plastic under variable flow velocity and oxygen concentration: the effect of in-plane thermal isotropy and anisotropy // Proceedings of the Combustion Institute. 2021. Vol. 38. Issue 3. Pp. 4857–4866. DOI: 10.1016/J.PROCI.2020.06.380
23. Gong J., Zhou X., Li J., Yang L. Effect of finite dimension on downward flame spread over PMMA slabs: experimental and theoretical study // International Journal of Heat and Mass Transfer. 2015.

- Vol. 91. Pp. 225–234. DOI: 10.1016/j.ijheat-masstransfer.2015.07.091
24. Gao S., Zhu G., Gao Y., Zhou J. Experimental study on width effects on downward flame spread over thin PMMA under limited distance condition // *Case Studies in Thermal Engineering*. 2018. Vol. 13. P. 100382. DOI: 10.1016/j.csite.2018.100382
 25. Илюшов Н.Я. Автоматические установки пожаротушения. Новосибирск : Изд-во НГТУ, 2016. 134 с.
 26. Markus E., Snegirev A., Kuznetsov E., Tanklevskiy L. Application of a simplified pyrolysis model to predict fire development in rack storage facilities // *Journal of Physics: Conference Series*. 2018. Vol. 1107. P. 042012. DOI: 10.1088/1742-6596/1107/4/042012
 27. Drysdale D. An introduction to fire dynamics. Chichester : John Wiley and Sons, 1985. 424 p.
 28. Markus E., Snegirev A., Kuznetsov E., Tanklevskiy L. Application of the thermal pyrolysis model to predict flame spread over continuous and discrete fire load // *Fire Safety Journal*. 2019. Vol. 108. P. 102825. DOI: 10.1016/j.firesaf.2019.102825
 29. Маркус Е.С., Снегирев А.Ю., Кузнецов Е.А., Танклевский Л.Т., Аракчеев А.В. Численное моделирование распространения пламени по дискретной совокупности горючих материалов // *Пожаровзрывобезопасность/Fire and Explosion Safety*. 2019. Т. 28. № 4. С. 29–41. DOI: 10.18322/PVB.2019.28.04.29-41
 30. Маркус Е.С., Кузнецов Е.А., Снегирев А.Ю. Естественно-конвективное турбулентное диффузионное пламя у вертикальной поверхности // *Физика горения и взрыва*. 2018. № 3 (54). С. 36–46. DOI: 10.15372/FGV20180304
 31. Snegirev A., Markus E., Kuznetsov E., Harris J., Wu T. On soot and radiation modeling in buoyant turbulent diffusion flames // *Heat and Mass Transfer*. 2018. Vol. 54. Issue 8. Pp. 2275–2293. DOI: 10.1007/s00231-017-2198-x
 32. Снегирев А.Ю., Коковина Е.С., Цой А.С., Талалов В.А., Степанов В.В. Интеграция моделей турбулентного пламени и пиролиза горючего материала: горение термопластиков // *Труды XXXI Сибирского теплофизического семинара*. Новосибирск 17–19 ноября 2014 г., Новосибирск, 2014. С. 226–233.

REFERENCES

1. Bondar A.I., Meshalkin E.A., Tanklevsky L.T., Tarantsev A.A., Tsarichenko S.G. About features of application of automatic fire containment installations. *Pozharovzryvobezopasnost/Fire and Explosion Safety*. 2019; 28(6):71-79. DOI: 10.18322/PVB.2019.28.06.71-79 (rus).
2. Zybina O.A., Tanklevsky L.T., Tarantsev A.A. On the problem of development of automatic fire containment systems. *Problems of Risk Management in the Technosphere*. 2019; 4(52):67-72. URL: <https://elibrary.ru/item.asp?id=41807858> (rus).
3. Povzik Ya.S. *Fire tactics*. Moscow, CJSC “Spetstekhnika” Publ., 2004; 416. (rus).
4. Terebnev V.V., Podgrushny A.V. *Fire tactics. Basics of fire extinguishing*. Ekaterinburg, Kalan Publ., 2008; 512. (rus).
5. Alpert R.L. Ceiling jet flows. *SFPE Handbook of Fire Protection Engineering*. 3rd ed. NFPA, 2002; 2-18-2-31. DOI: 10.1007/978-1-4939-2565-0_14
6. Sobur S.V. *Automatic fire extinguishing installations : handbook*. 3rd ed., rev. Moscow, CJSC “Spetstekhnika” Publ., 2003; 400. (rus).
7. Safronov V.V., Aksenova E.V. *Selection and calculation of parameters of fire extinguishing and alarm systems*. Orel, OrlSTU, 2004; 57. (rus).
8. Tarantsev A.A., Tanklevsky L.T., Snegirev A.Yu., Tsoi A.S., Kopylov S.N., Meshman L.M. Assessment of the sprinkler installation efficiency. *Pozharnaya Bezopasnost’/Fire Safety*. 2015; 1:72-79. URL: <https://elibrary.ru/item.asp?id=23092679> (rus).
9. Ilyushov N.Ya. *Automatic fire extinguishing installations*. Novosibirsk, NSTU Publishing House, 2016; 134. (rus).
10. Voronkov O.Yu. *Calculation, installation and operation of automatic fire extinguishing systems : training manual*. Omsk, Publishing House of OmSTU, 2016; 140. (rus).
11. Babikov I.A., Tanklevsky A.L., Tarantsev A.A. Determination method of sprinklers with electrical activation in case of internal fire. *Problems of Risk Management in the Technosphere*. 2019; 3(51):34-41. URL: <https://elibrary.ru/item.asp?id=41212640> (rus).
12. Xin Yibing, Burchesky K., de Vries J., Magistrale H., Zhou X., D’Aniello S. SMART sprinkler protection for highly challenging fires — Part 1: System design and function evaluation. *Fire Technology*. 2016; 53(5):1847-1884. DOI: 10.1007/s10694-017-0662-2
13. Grudanov O.V., Tarantsev A.A., Koroleva L.A. On the economic assessment of two ways to modernize automatic fire extinguishing systems. *Problems of Risk Management in the Technosphere*. 2007; 1: 38-42. (rus).
14. Meshman L.M., Tsarichenko S.G., Bylinkin V.A., Aleshin V.V., Gubin R.Yu. Design of water and foam automatic fire extinguishing systems. N.P. Kopylova (ed.). Moscow, VNIPO of the Ministry of Emergency Situations of the Russian Federation, 2002; 413. (rus).
15. Dougal Drysdale. The Pre-Flashover Compartment Fire. *An introduction to fire dynamics*. 3rd ed. 2011; 349-386. DOI: 10.1002/9781119975465.ch9
16. Williams F.A. Mechanisms of fire spread. *Symposium (International) on Combustion*. 1977; 16(1):1281-1294.

17. De Ris J.N. Spread of a laminar diffusion flame. *Symposium (International) on Combustion*. 1969; 12(1):241-252.
18. Fernandez-Pello A.C. A theoretical model for the upward laminar spread of flames over vertical fuel surfaces. *Combustion Flame*. 1978; 31:135-148.
19. Delichatsios M.A. Surface extinction of flames on solids: some interesting results. *Proceedings of the Combustion Institute*. 2007; 31(2):2749-2756. DOI: 10.1016/j.proci.2006.08.032
20. Frey A.E. et al. Near-limit flame spread over paper samples. *Combust. Flame*. 1976; 26(1):257-267.
21. Quintiere J.G. The effects of angular orientation on flame spread over thin materials. *Fire Safety Journal*. 2001; 36(3):291-312.
22. Kobayashi Y., Terashima K., Oiwa R., Tokoro M., Takahashi S. Opposed-flow flame spread over carbon fiber reinforced plastic under variable flow velocity and oxygen concentration: the effect of in-plane thermal isotropy and anisotropy. *Proceedings of the Combustion Institute*. 2021; 38(3):4857-4866. DOI: 10.1016/J.PROCI.2020.06.380
23. Gong J., Zhou X., Li J., Yang L. Effect of finite dimension on downward flame spread over PMMA slabs: experimental and theoretical study. *International Journal of Heat and Mass Transfer*. 2015; 91: 225-234. DOI: 10.1016/j.ijheatmasstransfer.2015.07.091
24. Gao S., Zhu G., Gao Y., Zhou J. Experimental study on width effects on downward flame spread over thin PMMA under limited distance condition. *Case Studies in Thermal Engineering*. 2018; 13:100382. DOI: 10.1016/j.csite.2018.100382
25. Ilyushov N.Ya. *Automatic fire extinguishing installations*. Novosibirsk, NSTU Publishing House, 2016; 134. (rus).
26. Markus E., Snegirev A., Kuznetsov E., Tanklevsky L. Application of a simplified pyrolysis model to predict fire development in rack storage facilities. *Journal of Physics: Conference Series*. 2018; 1107:042012. DOI: 10.1088/1742-6596/1107/4/042012 FIREANDEXPLOSIONS SAFETY 2021 VOLUME 30 No.141
27. Drysdale D. *An introduction to fire dynamics*. Chichester, John Wiley and Sons, 1985; 424.
28. Markus E., Snegirev A., Kuznetsov E., Tanklevsky L. Application of the thermal pyrolysis model to predict flame spread over continuous and discrete fire load. *Fire Safety Journal*. 2019; 108:102825. DOI: 10.1016/j.firesaf.2019.102825
29. Markus E.S., Snegirev A.Yu., Kuznetsov E.A., Tanklevsky L.T., Arakcheev A.V. Simulation of flame spread over discrete fire load. *Pozharovzryvbezopasnost/Fire and Explosion Safety*. 2019; 28(4): 29-41. DOI: 10.18322/PVB.2019.28.04.29-41 (rus).
30. Markus E.S., Kuznetsov E.A., Snegirev A.Yu. Natural convection turbulent diffusion flame near a vertical surface. *Combustion, Explosion and Shock Waves*. 2018; 3(54):36-46. DOI: 10.15372/FGV20180304 (rus).
31. Snegirev A., Markus E., Kuznetsov E., Harris J., Wu T. On soot and radiation modeling in buoyant turbulent diffusion flames. *Heat and Mass Transfer*. 2018; 54(8):2275-2293. DOI: 10.1007/s00231-017-2198-x
32. Snegirev A.Yu., Kokovina E.S., Tsoi A.S., Talalov V.A., Stepanov V.V. Integration of models of turbulent flame and pyrolysis of combustible material: combustion thermoplastics. *Proceedings of the XXXI Siberian Thermophysical Seminar. Novosibirsk, November 17–19, 2014*. Novosibirsk, 2014; 226-233. (rus).

Поступила 19.08.2022, после доработки 26.08.2022;
принята к публикации 13.09.2022

Received August 19, 2022; Received in revised form August 26, 2022;
Accepted September 13, 2022

Информация об авторах

ТАНКЛЕВСКИЙ Леонид Тимофеевич, д-р техн. наук, профессор, заведующий кафедрой Высшей школы техносферной безопасности, Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого, Россия, 195251, г. Санкт-Петербург, ул. Политехническая, 29; главный научный сотрудник, Санкт-Петербургский университет Государственной противопожарной службы Министерства Российской Федерации по делам гражданской обороны, чрезвычайным ситуациям и ликвидации последствий стихийных бедствий, Россия, 196105, г. Санкт-Петербург, Московский пр-т, 149; PIIID: 181476; Scopus Author ID: 57192367552; ResearcherID: S-1901-2017; ORCID: 0000-0002-2769-0086; e-mail: tanklevskiy@gefest-spb.ru

Information about the authors

Leonid T. TANKLEVSKIY, Dr. Sci. (Eng.), Professor, Head of Department of Higher School of Technosphere Safety, Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University, Polytechnicheskaya St., 29, Saint Petersburg, 195251, Russian Federation; Chief Researcher, Saint-Petersburg University of State Fire Service of the Ministry of the Russian Federation for Civil Defense, Emergencies and Elimination on Consequences of Natural Disasters, Moskovskiy Avenue, 149, Saint Petersburg, 196105, Russian Federation; ID RISC: 181476; Scopus Author ID: 57192367552; ResearcherID: S-1901-2017; ORCID: 0000-0002-2769-0086; e-mail: tanklevskiy@gefest-spb.ru

ТАРАНЦЕВ Александр Алексеевич, д-р техн. наук, профессор, заведующий лабораторией, Институт проблем транспорта им. Н.С. Соломенко Российской академии наук, Россия, 199178, г. Санкт-Петербург, 12-я линия ВО, 13; профессор, Санкт-Петербургский университет Государственной противопожарной службы Министерства Российской Федерации по делам гражданской обороны, чрезвычайным ситуациям и ликвидации последствий стихийных бедствий, Россия, 196105, г. Санкт-Петербург, Московский пр-т, 149; РИНЦ ID: 664653; Scopus Author ID: 57195636448; ResearcherID: K-2087-2018; ORCID: 0000-0003-1561-2483; e-mail: t__54@mail.ru

БОНДАР Александр Иванович, канд. техн. наук, доцент, Департамент образовательной и научно-технической деятельности Министерства Российской Федерации по делам гражданской обороны, чрезвычайным ситуациям и ликвидации последствий стихийных бедствий, Россия, 121352, г. Москва, ул. Давыдовская, 7; ORCID: 0000-0002-9210-3036; e-mail: ttt_home@mail.ru

БАЛАБАНОВ Иван Дмитриевич, аспирант, Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого, Россия, 195251, г. Санкт-Петербург, ул. Политехническая, 29; РИНЦ ID: 980446; Scopus Author ID: 57212561809; ResearcherID: GQH-8479-2022; ORCID: 0000-0002-1616-3504; e-mail: bid_home@mail.ru

Вклад авторов:

Танклевский Л.Т. — сформулирована проблема в части необходимости обоснования особенностей реализации АУСП как для сдерживания распространения пламени по пожарной нагрузки, так и по блокированию ОФП. Обоснована необходимость разработки ГОСТ «Автоматические установки сдерживания пожара. Методы испытания».

Таранцев А.А. — проведено количественное обоснование характеристик сдерживания площади распространения горения и сдерживания скорости нагрева перекрытий помещения.

Бондар А.И. — обоснована схема размещения оросителей с целью: а) сдерживания пожара в помещениях больших площадей; б) блокирования ОП в местах расположения дверей и окон помещения; в) разделения помещения протяженной формы на защищаемые зоны.

Балабанов И.Д. — разработана методика проведения эксперимента в части определения скорости распространения пламени на модельном очаге пожара, а также на модельном стенде в части распространения задымления и концентраций ТПГ.

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Alexander A. TARANTSEV, Dr. Sci. (Eng.), Professor, Head of Laboratory, Solomenko Institute of Transport Problems of the Russian Academy of Sciences, 12-th Line VO, 13, Saint Petersburg, 199178, Russian Federation; Professor, Saint-Petersburg University of State Fire Service of the Ministry of the Russian Federation for Civil Defense, Emergencies and Elimination on Consequences of Natural Disasters, Moskovskiy Avenue, 149, Saint Petersburg, 196105, Russian Federation; ID RISC: 664653; Scopus Author ID: 57195636448; ResearcherID: K-2087-2018; ORCID: 0000-0003-1561-2483; e-mail: t__54@mail.ru

Alexander I. BONDAR, Cand. Sci. (Eng.), Associate Professor, Department of Educational and Scientific and Technical Activities of the Ministry of the Russian Federation for Civil Defense, Emergencies and Elimination on Consequences of Natural Disasters, Davydkovskaya St., 7, Moscow, 121352, Russian Federation; ORCID: 0000-0002-9210-3036; e-mail: ttt_home@mail.ru

Ivan D. BALABANOV, Postgraduate Student, Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University, Polytechnicheskaya St., 29, Saint Petersburg, 195251, Russian Federation; ID RISC: 980446; Scopus Author ID: 57212561809; ResearcherID: GQH-8479-2022; ORCID: 0000-0002-1616-3504; e-mail: bid_home@mail.ru

Contribution of the authors:

Leonid T. Tanklevskiy — the problem is formulated in terms of the need to substantiate the features of the implementation of the AWP both to contain the spread of flame over the fire load and to block the OFP. The necessity of developing GOST "Automatic fire containment installations. Test methods".

Alexander A. Tarantsev — a quantitative substantiation of the characteristics of containment of the area of combustion propagation and containment of the heating rate of the room floors was carried out.

Alexander I. Bondar — the scheme of placement of sprinklers is justified for the purpose of: a) fire containment in large areas; b) blocking OP in the locations of doors and windows of the room; c) dividing the extended form of the room into protected zones.

Ivan D. Balabanov — a method of conducting an experiment has been developed in terms of determining the flame propagation velocity at a model fire source, as well as at a model stand in terms of smoke propagation and TPG concentrations.

The authors declare no conflict of interests.

Роботизированные установки пожаротушения — современные технологии пожаротушения с российским приоритетом

Юрий Иванович Горбань¹✉, Сергей Георгиевич Цариченко²

¹ Инженерный центр пожарной робототехники «ЭФЭР», г. Петрозаводск, Республика Карелия, Россия

² Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет, г. Москва, Россия

АННОТАЦИЯ

Введение. Установки пожаротушения — это стационарные технические средства для тушения пожара, эволюция развития которых непосредственно связана с общим уровнем развития техники. В настоящее время наибольшее применение находят автоматические установки пожаротушения (АУП), среди них массово применяются спринклерные АУП, запатентованные в 1864 г. англичанином Гаррисоном, и новые системы — роботизированные установки пожаротушения (РУП). Целью статьи является анализ и тенденции развития установок пожаротушения, обоснование приоритета России в создании современных технологий пожаротушения на базе РУП.

Установки пожаротушения: от ручных средств до роботизированных. Спринклерное пожаротушение обладает существенными недостатками: низкой чувствительностью и большой инерционностью. Ствольная пожарная техника является одним из основных и наиболее мощных средств борьбы с пожарами. Тушение пожара производится пожарными ствольщиками, которые находятся в экстремальных условиях, опасных для жизни. С развитием техники начинают исследоваться вопросы замены человека при тушении пожаров. Во многих странах появились мобильные пожарные роботы. На практике широкое применение получили стационарные пожарные роботы. Первый стационарный пожарный робот в России был создан в 1984 г. для защиты музея «Кижы». Он принимал также участие в ликвидации последствий аварии на Чернобыльской АЭС. Первая РУП была внедрена в 1989 г. на Ленинградской АЭС. Инженерным центром «ЭФЭР» при тесном взаимодействии с ВНИИПО МЧС России проводились научно-исследовательские работы по совершенствованию конструкции и системы управления, по созданию нормативно-правовой базы для РУП. По результатам этих работ Россия стала первой страной мира, где законодательно и нормативно введен новый вид автоматических установок пожаротушения — роботизированные установки пожаротушения. Требования к РУП установлены федеральным законом № 123-ФЗ, нормативными документами ГОСТ Р и сводами правил. Приоритет России в создании РУП закреплён целым рядом патентов.

Заключение. В нашей стране проведена большая многолетняя научно-исследовательская и опытно-конструкторская работа, в результате которой появились новые технологии пожаротушения — роботизированные установки пожаротушения с российским приоритетом. В стране создана также нормативно-техническая база, построен завод пожарных роботов. Новые технологии пожаротушения на базе пожарных роботов получили широкое распространение и защищают уже тысячи значимых объектов страны.

Ключевые слова: автоматические установки пожаротушения (АУП); спринклерные установки пожаротушения; пожарные роботы; пожарный водопровод; баллистика струй

Для цитирования: Горбань Ю.И., Цариченко С.Г. Роботизированные установки пожаротушения — современные технологии пожаротушения с российским приоритетом // Пожаровзрывобезопасность/Fire and Explosion Safety. 2022. Т. 31. № 5. С. 54–66. DOI: 10.22227/0869-7493.2022.31.05.54-66

✉ Горбань Юрий Иванович, e-mail: info@efer.pro

Robotic fire-fighting systems using advanced fire suppression technologies with Russian priority

Yuriy I. Gorban¹✉, Sergey G. Tsarichenko²

¹ Engineering Centre of Fire Robots Technology “FR”, Petrozavodsk, Republic of Karelia, Russian Federation

² Moscow State University of Civil Engineering (National Research University), Moscow, Russian Federation

ABSTRACT

Introduction. Fire suppression systems are stationary technical means designed for fire extinguishing. Their evolution relies on the general level of technological development. At present, automatic fire suppression systems

(AFSS) are most widely used; they include sprinkler AFSSs, patented in 1864 by Harrison, UK, as well as new robotic fire suppression systems (RFSS). The purpose of the article is to analyze the trends in the development of fire extinguishing systems, and substantiate Russia's priority in the development of advanced fire extinguishing technologies on the basis of robotic fire suppression systems (RFSS).

Fire suppression systems: from manually operated to robotic ones. Sprinkler fire extinguishing has significant drawbacks; they are low sensitivity and high inertia. Fire monitors are among the main most powerful means of firefighting. Fires are extinguished by firefighters who are in extreme life-threatening environments. The issue of replacing a person during fire extinguishing was studied. Mobile firefighting robots appear in many countries. In practice, stationary firefighting robots are widely used. The first stationary firefighting robot was invented in Russia in 1984 to protect the Kizhi Museum. It was also applied to liquidate the consequences of the accident at the Chernobyl nuclear power plant. The first RFSS was introduced at the Leningrad NPP in 1989. Acting in close cooperation with the VNIPO EMERCOM of Russia, FR Engineering Centre conducted research to improve the design and control system, establish the regulatory framework for the RFSS. As a result, Russia has become the first country in the world where a new type of automatic fire extinguishing systems, or robotic fire suppression systems, was introduced by the law. RFSS requirements are established by the Federal law No. 123-FZ, GOST R and Codes of Practice. Russia's priority right for the invention of RFSS is protected by a number of patents.

Conclusions. In our country, long-term research and development have been carried out to design new fire extinguishing technologies named robotic fire suppression systems. Regulatory and technical frameworks have also been established, and a firefighting robot plant has been built. Now new fire extinguishing technologies, involving firefighting robots, are widely spread; they protect thousands of significant facilities of the country.

Keywords: automatic fire suppression systems (AFSS); sprinkler fire extinguishing systems; firefighting robots; fire main; jet ballistics

For citation: Gorban Yu.I., Tsarichenko S.G. Robotic fire-fighting systems using advanced fire suppression technologies with Russian priority. *Pozharovzryvobezopasnost/Fire and Explosion Safety*. 2022; 31(5):54-66. DOI: 10.22227/0869-7493.2022.31.05.54-66 (rus).

✉ Yuriy Ivanovich Gorban, e-mail: info@efer.pro

Введение

Установки пожаротушения — это совокупность стационарных технических средств для тушения пожара [1]. Эволюция развития этих технических средств непосредственно связана с общим уровнем развития техники [2]. В настоящее время наибольшее применение находят автоматические установки пожаротушения (АУП), применение которых регламентировано сводом правил СП 485.1311500.2020 [1]. Среди них массово применяются sprinklerные установки пожаротушения ГОСТ Р 51043–2002¹. Перспективно развиваются и новые системы — роботизированные установки пожаротушения ГОСТ Р 53326–2009². Сравнительный анализ этих систем рассмотрен в статьях «Роботизированные установки пожаротушения — альтернатива традиционным водопенным системам пожаротушения» [3] и «От sprinklerов к пожарным мини-роботам» [4]. Целью статьи является анализ и тенденции развития установок пожаротушения, обоснование приоритета России в создании современных технологий пожаротушения — роботизированных установок пожаротушения, закрепленных патентами и нормативно-правовой базой по их применению для защиты объектов, предоставление информации об организации производства пожарных роботов

в России и о применении РУП для защиты значимых объектов страны.

Установки пожаротушения: от ручных средств до роботизированных

Установки пожаротушения составляют основу защиты пожароопасных объектов. В качестве огнетушащего вещества наиболее широко применяется вода как эффективное, доступное и экологически безвредное средство. Состав технических средств установок водяного пожаротушения невелик и включает в себя: *пожарную сигнализацию, насосную, подающую воду от источника водоснабжения, пожарный водопровод, устройства тушения.*

Установки пожаротушения и технические средства, в них входящие, имеют свою историю развития от первых ручных средств тушения до автоматических и роботизированных установок пожаротушения в наше время.

С древнейших времен люди сталкивались с огнем, считали его сверхъестественной силой и при пожаре в панике спасались бегством. Противостоять огненной стихии человек не мог, и организация пожарной службы в Древнем Риме сводилась к *пожарной сигнализации* — подаче сигналов тревоги при пожарах. По сути, это были своеобразные сигналы SOS — «Спасайтесь кто может!». Хотя уже

¹ ГОСТ Р 51043–2002. Установки водяного и пенного пожаротушения автоматические. Оросители. Общие технические требования. Методы испытаний. Введ. 01.07.2003. М.: ИПК Изд-во стандартов, 2002.

² ГОСТ Р 53326–2009. Техника пожаротушения. Установки пожаротушения роботизированные. Общие технические требования. Методы испытаний. Введ. 01.01.2010. М.: Стандартинформ, 2009.

тогда был *водопровод*, «сработанный рабами Рима», но об использовании его как средства доставки воды для пожаротушения не было и речи [2].

В Средние века пожары с катастрофическими последствиями были частым явлением. Уровень развития общества позволял решать только некоторые вопросы противопожарной защиты, к которым можно отнести контроль обстановки с наблюдательных вышек, *подачу сигнала «тревога» для оповещения населения о пожаре, организацию доставки воды* к месту пожара путем введения обязательств извозчикам. Тушение же было делом самих домовладельцев, ремесленных и цеховых сообществ, в чьих хозяйствах случался пожар.

Организованная борьба с огнем началась, по существу, с XVIII века в ходе государственных преобразований и технических революций. Первая *установка водяного пожаротушения* была предложена в 1770 г. русским изобретателем К.Д. Фроловым, работавшим в рудоуправлении в Алтайском крае. Изобретение представляло собой стационарную *насосную установку с водопроводной сетью* для пожаротушения. Для водопровода тогда применялись кожаные клепаные рукава, на концах которых в качестве *устройств тушения* закреплялись длинные медные стволы. Это было большим достижением, так как до этого подача воды к месту пожара осуществлялась ведерными бригадами, передававшими воду из рук в руки в кожаных ведрах.

В 1806 г. англичанин Джон Кэри запатентовал *автоматическую установку пожаротушения*. Он предложил в защищаемом помещении проложить сеть трубопроводов от водонапорного бака, а на сети установить *устройства тушения* в виде оросителей с мелкими отверстиями. В защищаемом помещении протягивался горючий шнур, при перегорании которого открывался клапан, подающий воду. В 1864 г. англичанин Стюарт Гаррисон разработал *устройство тушения* — спринклерный ороситель. Дальнейшее развитие спринклерных установок связано с именами американцев Генри Пармели и Фредерика Гриннеля. В 1902 г. Гринель запатентовал конструкцию водосигнального клапана. Спринклеры представляют собой оросительные головки с тепловыми замками, вмонтированными в распределительные водозаполненные трубы. При срабатывании теплового замка от очага возгорания спринклер включается в работу, орошая распыленной водой площадь порядка 12 м². Конструкция этого устройства оказалась столь проста и надежна, что спринклеры нашли массовое применение практически на всех пожароопасных объектах: во всем мире их установлено около 1 млрд.

Вместе с тем спринклерное пожаротушение обладает двумя существенными недостатками: низкой чувствительностью и большой инерционностью. В ряде случаев это приводит к тому, что начало тушения происходит со значительной задержкой. При этом площадь пожара растет быстрее, чем площадь, орошаемая вскрывшимися спринклерами, что приводит к неконтролируемому развитию пожара. По имеющимся статистическим данным, более половины эксплуатируемых установок оказываются неэффективными и не выполняют задачу по ликвидации или сдерживанию пожара. Спринклерные оросители — одноразовые устройства, которые необходимо заменять после срабатывания. Это обстоятельство усложняет также проверку готовности системы. Кроме того, система может не активироваться даже после срабатывания пожарной сигнализации, настроенной на задымление, так как ключевым показателем является критическая температура в помещении. Решением данной проблемы является использование специальных спринклеров с принудительной системой активации, что приводит к необходимости прокладки дополнительного кабеля к каждому спринклеру [5].

Установленным порядком действий при пожаре на объекте при срабатывании автоматических установок пожаротушения предусматривается безусловный выезд подразделений пожарной охраны, которые выезжают на тушение в зависимости от ранга пожара с необходимым количеством ручных и лафетных стволов.

Ствольная пожарная техника является одним из основных и наиболее мощных средств борьбы с пожарами, стоящих на вооружении пожарных частей или входящих непосредственно в оснащение противопожарной защиты объектов. Как свидетельствует история пожарной охраны, тушение ни одного пожара не обходится без применения лафетных стволов. Их роль при тушении настолько велика, что даже масштабы пожара принято оценивать количеством задействованных лафетных стволов.

Тушение пожара производится пожарными ствольщиками, которые находятся в непосредственной близости от пожара, в экстремальных условиях, опасных для жизни.

С развитием техники начинают исследоваться вопросы замены человека при тушении пожаров.

Известны технические решения по автоматическому управлению стволом, см., например, а.с. № 370950 «Устройство для наведения огнетушащей струи на очаг пожара» (1970 г.) [6]. Устройство включает в себя датчики обнаружения возгорания с механическим сканированием, лафетный ствол, приводы наведения, блок управления. Система работает по жесткой логике с наведением струи

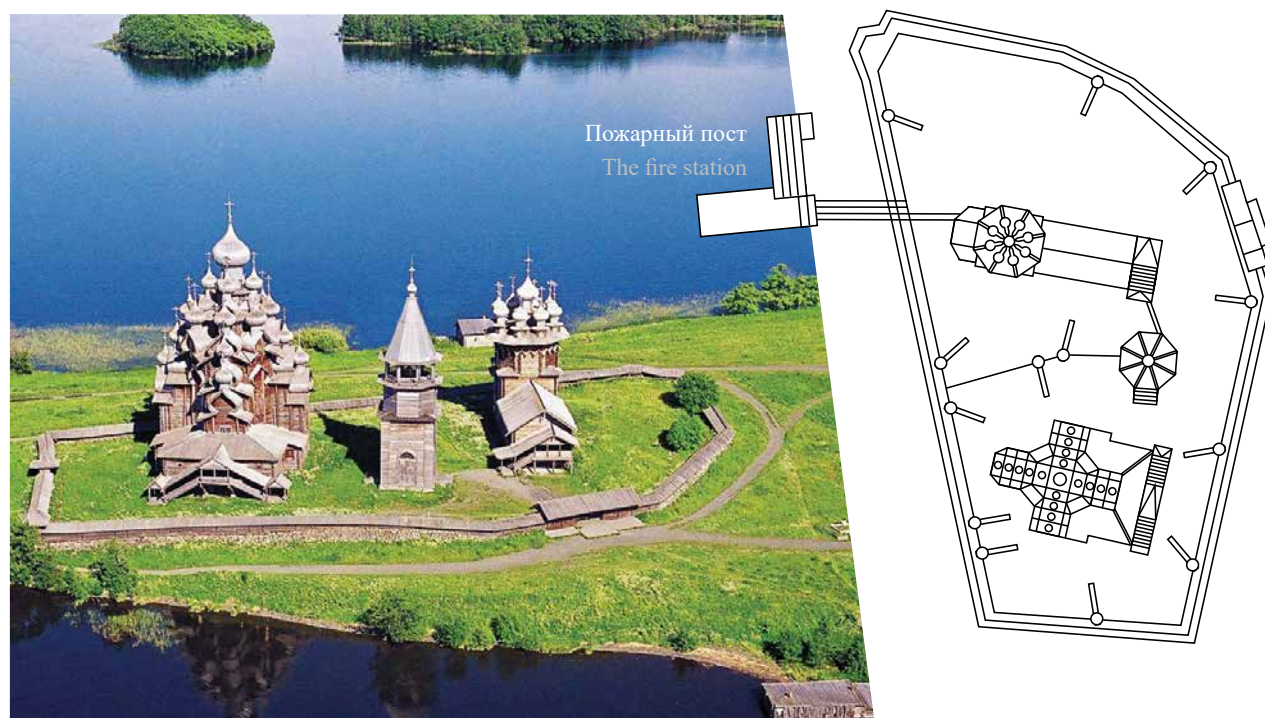


Рис. 1. Кижский погост

Fig. 1. The Kizhi churchyard

на первую точку срабатывания, имеет большую инерционность. Устройство по а.с. № 689683 «Автоматическая лафетная установка для тушения пожаров» (1977 г.) [7] работает также по жесткой логике. Оба предложенных устройства имеют громоздкую конструкцию, далекую от совершенства, и не нашли практического применения.

Распространение с 70-х гг. прошлого века устройств робототехники в различных сферах деятельности не обошло и пожарное дело. Во многих странах появились мобильные пожарные роботы. Решались в основном вопросы преодоления препятствий, навигации и разведки для обнаружения возгораний [8]. Однако их применение для тушения пожаров оказалось проблематичным. Даже для ствола небольшого расхода 20 л/с при тушении в течение часа — минимального нормативно установленного времени — потребуется 72 т воды. Везти такое количество воды технически сложно. Подключение же пожарных роботов пожарным рукавом к источнику воды резко снижает их маневренность.

На практике широкое применение получили стационарные пожарные роботы, установленные прямо на пожарном трубопроводе, которые имеют рабочую зону в радиусе действия струи R , что составляет, к примеру, $R = 100$ м при расходе 100 л/с.

Первый пожарный робот в нашей стране был создан в 1984 г. в Петрозаводске [9] для защиты памятников деревянного зодчества музея-заповедника «Кижи» (рис. 1, 2).

В разработке участвовали инженеры Ю. Горбань, Н. Попов, А. Соколов. Это была альтернатива спринклерной системе, которую было сложно технически применить для наружного пожаротушения. Пожарные роботы первого поколения приняли также непосредственное участие в ликвидации последствий аварии на Чернобыльской АЭС [10].

На их базе в Петрозаводске также впервые была создана роботизированная установка пожаротушения РУП-С20-П1-2, с устройством технического зрения на базе телевизионной камеры ПТУ-45-1 по а.с. 1280418 (1985 г.) [11], которая прошла успешно межведомственные комплексные испытания и была рекомендована для применения



Рис. 2. Техническое совещание с участием головных организаций страны по пожарной безопасности

Fig. 2. An engineering meeting of representatives of Russia's leading fire safety organizations

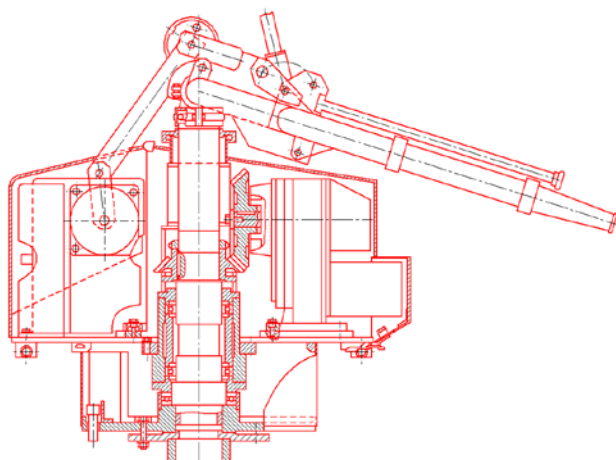


Рис. 3. РУП-С20-П1-2. Чертеж общего вида

Fig. 3. RFSS-S20-P1-2. General arrangement drawing

ния на различных объектах народного хозяйства. В 1987 г. эта роботизированная установка пожаротушения была удостоена золотой медали ВДНХ [10] (рис. 3, 4).

Проследим с этого времени дальнейшее развитие стационарных пожарных роботов и роботизированных установок пожаротушения по патентным исследованиям, определяющим достигнутый уровень техники. Изменения, конечно, большие. Достаточно сказать, что, если пожарный робот первого поколения с расходом 20 л/с весил 200 кг, то сейчас он весит не более 20 кг, так же как установленная мощность приводов стволов с расходом 60 л/с составляла 1,1 кВт, то сейчас — 0,12 кВт. Система управления в автоматическом режиме



Рис. 4. РУП-С20-П1-2. Блок управления, телекамера ПТУ-45-1, устройство технического зрения и видео-контрольное устройство

Fig. 4. RFSS-S20-P1-2. Control unit, TV-camera PTU-45-1, computer vision and video control devices

выполняла только функцию наведения на очаг возгорания, система же современного пожарного робота multifunctional, имеет элементы искусственного интеллекта для адаптации к быстроменяющейся обстановке пожара.

Конструкция была значительно облегчена, когда громоздкие зубчатые передачи были заменены на прямое вращение ствола исполнительными механизмами типа МЭО, см. а.с. № 1824207 (1990 г.) [12],

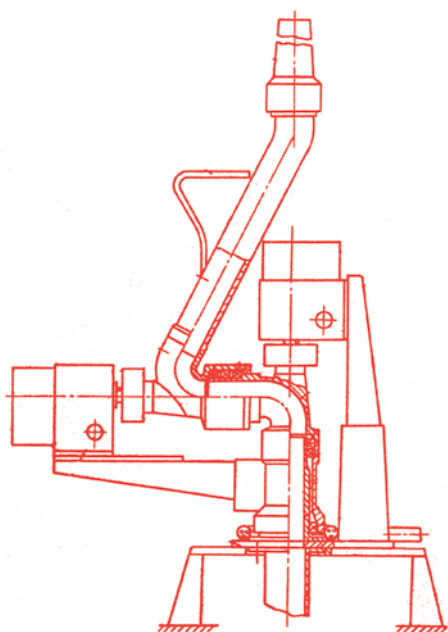
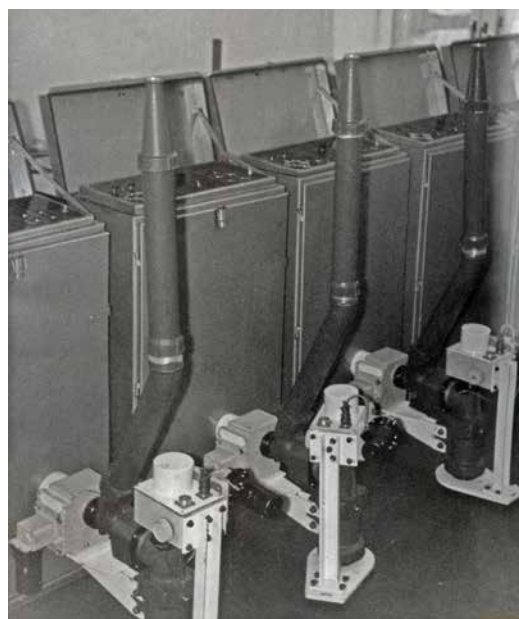


Рис. 5. Конструкция пожарного робота по патенту № 1824207

Fig. 5. The design of the firefighting robot according to Patent 1824207



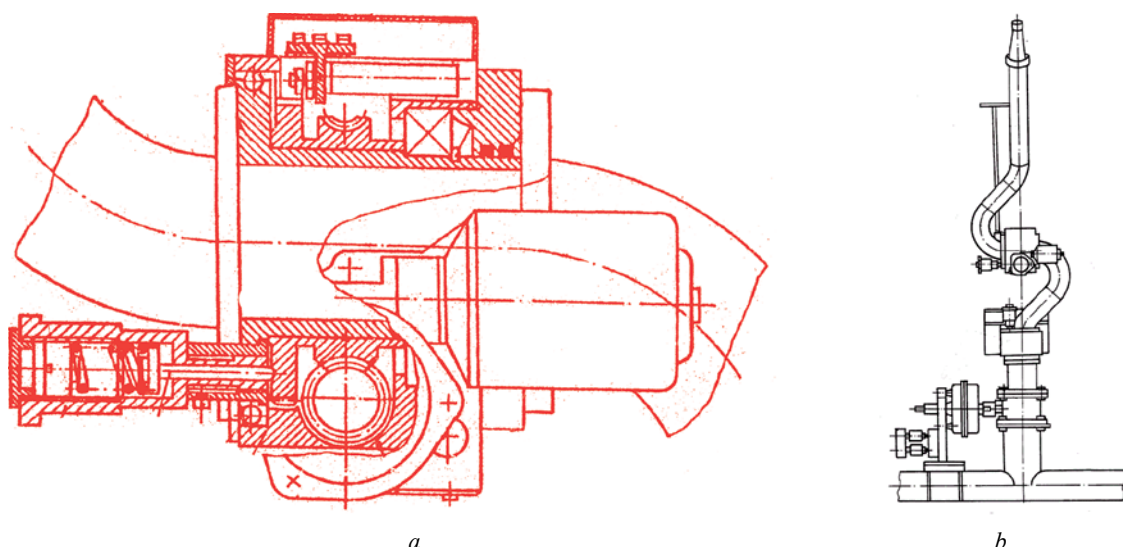


Рис. 6. Механизм наведения (а) и общий вид пожарного монитора (b)

Fig. 6. Guidance mechanism (a) and general view of the firefighting monitor (b)

(рис. 5). В этом варианте пожарные роботы, созданные в Петрозаводской лаборатории пожарных роботов, были успешно внедрены в 1989 г. для защиты машинных залов Ленинградской АЭС.

Вместе с тем сами покупные исполнительные механизмы были громоздкими и, по сути, диктующими параметры изделия в целом. В а.с. № 2050872 (1991 г.) [13] было предложено техническое решение, которое легло в основу уже современной конструкции пожарных роботов с использованием полого червячного колеса, встроенного в трубную конструкцию. Это решение, в совокупности с шарнирными шариковыми соединениями, позволило значительно снизить мощность приводов.

В целом получилось настолько рационально, что стало классическим решением, используемым

инженерами и в других странах (рис. 6). Пожарные роботы и лафетные стволы с дистанционным управлением в этом конструктиве начали изготавливаться на производственной базе Инженерного центра пожарной робототехники «ЭФЭР» с середины 90-х гг., а с начала 2000-х гг. — серийно.

Претерпела изменения водопоточная конструкция для перемещения струи в вертикальной плоскости, в которой традиционная трубная S-конструкция с общим числом поворотов трубы 540° заменена на шаровой поворотный канал с одним поворотом на 30°, см. патенты РФ № 2412733 (2009 г.) [14] и № 2661324 (2017 г.) [15]. В сочетании с удлиненным валом в конструкции по патенту РФ № 2375093 (2008 г.) [16] это также позволило значительно уменьшить весогабаритные показатели (рис. 7).

Патентом РФ № 2373980 (2008 г.) [17] разработан вариант пожарного робота на 3 степени подвижности, что позволяет менять точку наведения при ее перекрытии местными препятствиями.

Для стабилизации струи разработан насадок-автомат по патенту РФ № 2414270 (2009 г.) [18], автоматически поддерживающий напор при изменении расхода.

Для повышения дальности в струеформирующей части насадка введены конструктивные элементы с использованием гидродинамических эффектов по патенту РФ № 2700581 (2009 г.) [19], которые, в сочетании с коноидальными поверхностями, позволили повысить коэффициент прохода.

Эти введения были заложены в устройство пожарных роботов и определили его конструктивные признаки, см. патенты РФ № 90498 (2013 г.) [20] и № 124890 (2020 г.) [21] и рис. 8. Современный



Рис. 7. Лафетный ствол ЛСД-С40(20,30)Уш

Fig. 7. Fire monitor LSD-S40(20,30)Ush



Рис. 8. Пожарный робот ПР-ЛСД-С40(20,30)Уш-ИК-УФ-ТВ «FR-Master»

Fig. 8. Firefighting robot FR-LSD-S40(20,30)Ush-IR-UF-TV "FR-Master"

стационарный пожарный робот включает в себя рабочий орган в виде ствола с насадком, сенсорную часть и систему управления. Ствол имеет приводы управления пространственным положением и включает в себя подвижные звенья. Подвижные звенья конструктивно выполнены для возможности перемещения в них потока жидкой среды под давлением. Во внешнем виде пожарного робота сочетаются требования к эстетическому восприятию и условиям эксплуатации изделия. По сути, робот пожарный, предназначенный для замены пожарного ствольщика в опасных местах, должен эргономически соответствовать человеку в оперативной меняющейся обстановке и выполнять его команды. Промышленный дизайн изделия и применение шарового поворотного канала позволили создать компактную конструкцию, в которой все мелкие элементы, датчики, кабели заключены в защитную обтекаемую оболочку с выделенной головной частью с оптическими устройствами обнаружения загорания, со стволом-автоматом, гармонично вписанным в корпус. Принятое размещение оборудования в едином защищенном корпусе обеспечивает защиту от влияния внешней среды в виде температурных, климатических и механических воздействий.

Появился также новый вид малорасходных пожарных мини-роботов в потолочном исполнении, которые широко применяются в торгово-развлекательных центрах и местах с массовым пребыванием людей, см. патент РФ № 2699849 (2019 г.) [22] и рис. 9.

Стационарные пожарные роботы стали использоваться в функции автоматических установок пожаротушения. Впервые базовые компоненты, система программного управления с алгоритмом работы были запатентованы в составе роботизированных установок пожаротушения (РУП) патен-



Рис. 9. Пожарный робот ПР-ЛСД-С10(15,20)Уш-ИК

Fig. 9. Firefighting robot FR-LSD-S10(15,20)Ush-IR

тами РФ № 2128536 «Роботизированная установка пожаротушения» (1997 г.) [23] и № 2319530 «Роботизированный пожарный комплекс» (2005 г.) [24].

Все компоненты РУП представлены на рис. 10, *b*, которую тут же, на рис. 10, *a*, можно сравнить со спринклерной установкой пожаротушения. Водоснабжение подается магистральным трубопроводом только до пожарного робота. Далее доставка воды осуществляется адресно по воздуху — так, как это бы делал пожарный ствольщик. Рассмотрим РУП с насосной производительностью 20 л/с (значительно меньшей, чем у спринклерной установки — 30 л/с). Но на очаг возгорания попадает

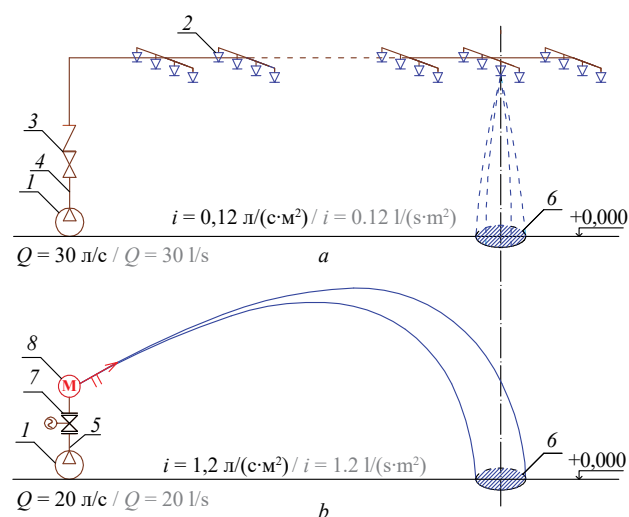


Рис. 10. Схемы спринклерной (*a*) и роботизированной установок пожаротушения (*b*): 1 — водопитатель (насосная); 2 — ороситель; 3 — узел управления; 4 — подводящий трубопровод; 5 — распределительный трубопровод; 6 — защищаемый участок, $S = 12 \text{ м}^2$; 7 — задвижка; 8 — пожарный робот

Fig. 10. Sprinkler (*a*) and robotic fire suppression systems (*b*) schemes: 1 — water feeder (pump station); 2 — sprinkler; 3 — control unit; 4 — supply pipeline; 5 — distribution pipeline; 6 — protected area, $S = 12 \text{ м}^2$; 7 — valve; 8 — firefighting robot

весь расход и интенсивность на той же площади 12 м², что и у спринклера, получается кратно выше. Площадь, защищаемая небольшим пожарным роботом с расходом 20 л/с и дальностью подачи струи 50 м, составляет более 7500 м² ($\pi R^2 = \pi \cdot 50^2$). Весь расход огнетушащего вещества (с учетом потерь) может быть направлен на очаг возгорания и обеспечивать интенсивность орошения более 1,2 л/(с·м²) на площади 12 м². Такая высокая интенсивность позволяет быстро подавлять огонь в ранней стадии развития пожара.

В спринклерных системах для защиты площади 7500 м² потребовалось бы около 650 оросителей и 3 км труб. Все эти материалы, включая стоимость монтажных работ на высоте, у РУП отсутствуют. Несмотря на то, что максимальный расход для спринклерных систем определен как 30 л/с для 2-й группы помещений, обеспечивается только фиксированная интенсивность орошения. Более высокую интенсивность, в отличие от РУП, спринклерная установка по своей конструкции обеспечить не может.

Одновременно с совершенствованием конструкции и системы управления Инженерным центром пожарной робототехники «ЭФЭР», при тесном взаимодействии с ВНИИПО МЧС России, проводились научно-исследовательские работы по созданию нормативно-правовой базы по применению роботизированных установок пожаротушения [25].

По результатам этих работ Россия стала первой страной мира, где законодательно и нормативно введен новый вид автоматических установок пожаротушения — роботизированные установки пожаротушения. Требования к РУП установлены федеральным законом № 123-ФЗ³, нормативными документами ГОСТ Р 53326–2009³, СП 485.1311500.2020 [1], ВНПБ 39-20⁴.

Приоритет России в создании роботизированных установок пожаротушения закреплен целым рядом патентов РФ, полученных по результатам проведения большого объема многолетних научно-исследовательских работ.

Насколько важны современные технологии, можно судить по отношению к ним на Западе: «Мы, народы Запада, ЕС и США, мы — властелины мира... но только пока мы контролируем передовые технологии... Если мы не сможем диктовать стандарты, мы потеряем власть», — Ж. Боррель, верховный представитель Евросоюза по иностранным делам и безопасности [26].

Роботизированные установки пожаротушения — это современные цифровые интеллектуальные системы управления, это новые подходы в технологии пожаротушения, основанные

на применении пожарных роботов, воплотивших в себе последние достижения науки и техники, которые значительно расширили технические возможности автоматических установок пожаротушения. Они кардинально меняют подход к организации процесса тушения, в основе которого сочетание принципов автоматического управления и алгоритмов управления поведением пожарных роботов в условиях недетерминированной среды в меняющейся обстановке пожара. В эти алгоритмы заложены эффективные технологии пожаротушения и профессиональные приемы, используемые пожарными ствольщиками, апробированные на практике.

Рассмотрим круг задач, решаемых РУП, формирующих их функциональные возможности и принятые технические решения по реализации этих задач, подтвержденные патентами.

1. Готовность

Соблюдение 100%-ной готовности к защите объекта обеспечивается 100%-ным резервированием, надежностью и самотестированием всех элементов, с регистрацией событий на удаленном сервере с санкционированным доступом, исключая человеческий фактор. Патент РФ № 2677622 [27].

2. Предупредительный мониторинг

Предупреждение о наличии аномально нагретых зон, предшествующих загоранию. Пожарный робот ведет наблюдение в ИК-диапазоне и при температуре, близкой к возгоранию, в местах вероятного нагрева (кабели, электрооборудование и др.), сообщает о месторасположении аварийного участка. Патент РФ № 2736432 [28].

3. Наведение по координатам

Основная задача пожарного робота — определение координат очага возгорания и тушение его струей. Координаты очага определяются по данным датчиков наведения в ИК- и УФ-диапазоне и расстояния. Струя наводится по баллистической траектории с учетом базы данных реальных траекторий струй. Патент РФ № 2128536 [29].

4. Раннее обнаружение, быстрое тушение

Определить очаг загорания в начальной стадии и тушить всем расходом (мечта пожарного). Для пожарного робота норма — обнаружить очаг загорания 0,1 м² и тушить его всем расходом. При таком сосредоточении мощности потушить очаг в начальной стадии — решаемая задача. Патент РФ № 2739390 [30].

5. Контроль развития и тушения пожара

Следить за меняющейся пожарной обстановкой. При отсутствии признаков пожара тушение прекра-

³ Технический регламент о требованиях пожарной безопасности : Федеральный закон от 22 июля 2008 г. № 123-ФЗ.

⁴ ВНПБ 39-20. Роботизированные установки пожаротушения. Нормы и правила проектирования.

щается, и система переходит в режим мониторинга. Патент РФ № 2424837 [31].

6. Целевое применение воды

Вода подается только в направлении огня, не причиняя ущерб от воздействия избыточной воды участкам, не подверженным действию огня. При выходе из зоны горения включается быстродействующий клапан перекрытия потока. Патент РФ № 2699849 [22].

7. Контроль наведения струи на очаг

Распознавание струи и введение обратной связи по положению струи относительно очага возгорания. Корректировка наведения струи при ее отклонении от очага возгорания. Патент РФ № 2433847 [32]. Европатент № 2599525 [33].

8. Эффективное тушение

Тушение эффективной частью струи горящей поверхности очага. Эффективность тушения при циклическом тушении строчным сканированием струи по площади обеспечивается равномерностью подачи, определяемой правильно выбранным шагом сканирования, который приравняется к размеру эффективной части струи с наиболее высокой интенсивностью орошения. Патент РФ № 2739820 [34].

9. Живучесть системы

Высокая живучесть достигается 100%-ным резервированием с глубоким эшелонированием функциональных органов управления. На смену роботу, вышедшему из строя, приходит второй. При отказе автоматической системы производится переход на дистанционный режим, при отказе дистанционного — на ручной. Авторское свидетельство СССР № 2050872 [13], патент РФ № 2128536 [23].

10. Связь с РУП

В течение срока службы производится сбор данных о состоянии системы, с возможностью обновления программы и управления РУП в удаленном доступе. Патент РФ № 2677622 [27].

11. Интеграция с другими системами

Интеграция в базовую систему РУП других систем пожаротушения с применением единой системы определения координат возгорания, патент РФ № 2760650 [35].

12. Комплексное решение многофункциональных задач

Комплексное обеспечение полномасштабной защиты объектов от пожаров, патент РФ № 2775482 [36].

В настоящее время разработана автоматизированная программа выбора технологий автоматического пожаротушения на базе роботизированных и спринклерных систем⁵ [37]. В программу вводятся исходные данные объекта



Рис. 11. Памятный знак первому пожарному роботу в СССР

Fig. 11. A monument to the first firefighting robot in the USSR

защиты, а система сама определяет параметры для эффективного пожаротушения в соответствии с установленными требованиями. По сути, эта программа выполняет функции робота-проектировщика, а пользователь ведет с ним диалог по исходным данным и выбору предлагаемых вариантов. Результатом является принятие оптимизированных согласованных решений.

Хотелось бы отметить, что работа по пожарной робототехнике и ее научно-технические достижения нашли широкую поддержку у специалистов пожарного дела нашей страны. В 2020 г., в год столетия роботов, эта работа была удостоена премии Правительства РФ в области науки и техники [38].

К работам по роботизированным установкам пожаротушения в нашей стране проявлен интерес и в зарубежных странах [39]. Известно также применение в ряде стран лафетных стволов с программным управлением в автоматических установках пожаротушения: в Швеции — фирма Unifire, в США — фирма Johnson&Controls, в Китае — компания Shenyang Jinwei Fire Equipment.

В Петрозаводске перед фасадом здания Завода пожарных роботов установлен памятный знак первому пожарному роботу, положившему начало нового направления в пожарном деле — пожарной робототехнике (рис. 11).

Заключение

В нашей стране проведена большая многолетняя научно-исследовательская и опытно-конструкторская работа, в результате которой появились новые технологии пожаротушения — роботизиро-

⁵ Веб-приложение доступно на сайте www.firerobots.ru

ванные установки пожаротушения с российским приоритетом. В стране создана также нормативно-техническая база, построен завод пожарных роботов, которые получили широкое распространение и защищают уже тысячи объектов, в том числе особо важные и социально значимые: стадионы «Газпром Арена», «Лужники»; космодромы Плесецк, Восточный; аэропорты Шереметьево, Вну-

ково, Остафьево, Минский; промышленные объекты: заводы Алмаз-Антей; объекты нефтегазового комплекса: НПЗ Сызранский, Московский, Туапсинский, Ачинский и др., нефтяные платформы компании «Лукойл», нефтяные морские терминалы в Бургасе и по проекту «Сахалин-1»; объекты энергетики: Ленинградская АЭС, Петро-заводская ТЭЦ.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. СП 485.1311500.2020. Системы противопожарной защиты. Установки пожаротушения автоматические. Нормы и правила проектирования : приказ МЧС России от 31.08.2020 № 628, введ. 01.03.2021.
2. *Абрамов В.А., Сметанин В.С.* История пожарной охраны. Философско-методологические проблемы пожарной безопасности. М. : Академия ГПС МЧС России, 2012. С. 26.
3. *Синельникова Е.А., Слепцова И.Н., Горбань М.Ю.* Роботизированные установки пожаротушения — альтернатива традиционным водопенным системам пожаротушения // Пожарная безопасность. 2017. № 1. С. 60–66. URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=28844563>
4. *Горбань Ю.И.* От спринклеров к пожарным мини-роботам // Пожарная автоматика. Средства спасения. 2018. С. 44–45.
5. *Горбань Ю.И., Танклевский Л.Т.* Новые технические средства пожаротушения тонкораспыленной водой // Безопасность: Всероссийский специализированный журнал. 2017. № 4. С. 34–35.
6. А.с. 370950 СССР, МПК А62С 37/04 (2000.01). Устройство для наведения огнетушащей струи на очаг пожара / Л.М. Мешман. № 1488694/29-14, заявл. 02.11.1970; опубл. 22.11.1973. Бюл. № 12.
7. А.с. 689683 СССР, МПК А62С37/00. Автоматическая лафетная установка для тушения пожаров / В.М. Смирнов, Ю.В. Смирнов. № 2513293/29-12, заявл. 29.07.1977; опубл. 05.10.1979. Бюл. 37.
8. *Pengcheng Liu, Hongnian Yu.* Robot-assisted smart firefighting and interdisciplinary perspectives // Proceedings of the 22nd International Conference on Automation & Computing, University of Essex, Colchester, UK, 7–8 September 2016. 2016. DOI: 10.1109/ICoAC.2016.7604952
9. *Корсунский В.* Разработка противопожарных роботов в России // Мир и безопасность. 2007. № 3. С. 42–46.
10. *Горбань Ю.И.* Пожарные роботы и ствольная техника в пожарной автоматике и пожарной охране. М. : Пожнаука, 2013. 351 с.
11. А.с. 1280418 СССР, МПК G08B 17/12 (2000.01). Устройство для пожарной сигнализации / Н.Л. Попов, Ю.И. Горбань, А.И. Кирьянов. № 3940038/24-24, заявл. 26.07.1985; опубл. 30.12.1986. Бюл. № 48.
12. А.с. 1824207 СССР, МПК А62С 35/00 (2000.01). Пожарный монитор / Ю.И. Горбань, А.В. Харитонов, Т.Н. Романова, В.И. Ниронен, Г.Н. Кудрявцев, А.В. Мальцев и др. № 4879274, заявл. 05.10.1990; опубл. 30.06.1993.
13. А.с. 2050872 СССР, МПК А62С 35/00 (1995.01). Пожарный монитор / Ю.И. Горбань, Ю.П. Левин. № 5007706/12, заявл. 23.10.1991; опубл. 27.12.1995.
14. Пат. 2412733 РФ, МПК А62С 31/02 (2006.01). Пожарный монитор с шаровым шарниром / Ю.И. Горбань. № 2009142666/12, заявл. 18.11.2009; опубл. 27.02.2011. Бюл. № 6.
15. Пат. 2661324 РФ, МПК А62С 31/02 (2006.01). Лафетный ствол с поворотным шаровым каналом / Ю.И. Горбань. № 2017100578, заявл. 09.01.2017; опубл. 13.07.2018. Бюл. № 20.
16. Пат. 2375093 РФ, МПК А62С 31/00 (2006.01). Пожарный монитор / Ю.И. Горбань. № 2008119740/12, заявл. 19.05.2008; опубл. 10.12.2009. Бюл. № 34.
17. Пат. 2373980 РФ, МПК А62С 31/00 (2006.01). Пожарный монитор / Ю.И. Горбань. № 2008119732/12, заявл. 19.05.2008; опубл. 27.11.2009. Бюл. № 33.
18. Пат. 2414270 РФ, МПК А62С 31/00 (2006.01). Автомат пожарного / Ю.И. Горбань. № 2009146807/12, заявл. 16.12.2009; опубл. 20.03.2011. Бюл. № 8.
19. Пат. 2700581 РФ, МПК А62С 31/00 (2006.01). Пожарный водопенный ствол, генерирующий пену средней кратности / Ю.И. Горбань, И.М. Абдурагимов. № 2018143189, заявл. 05.12.2018; опубл. 18.09.2019. Бюл. № 26.
20. Пат. 90498 РФ, МКПО 29-01. Робот пожарный / Ю.И. Горбань. № 2013501978, заявл. 29.05.2013; опубл. 16.10.2014. Бюл. № 10.
21. Пат. 124890 РФ, МКПО 29-01. Робот пожарный / Ю.И. Горбань. № 2020504188, заявл. 11.09.2020; опубл. 20.04.2021. Бюл. № 5.
22. Пат. 2699849 РФ, МПК А62С 37/00 (2006.01). Пожарный мини-робот в потолочном исполнении / Ю.И. Горбань. № 2019102082, 25.01.2019, опубл. 11.09.2019. Бюл. № 26.
23. Пат. 2128536 РФ, МПК А62С 37/00 (1995.01). Роботизированная установка пожаротушения /

- Ю.И. Горбань. № 97101104/12, заявл. 22.01.1997; опубл. 10.04.1999.
24. Пат. 2319530 РФ, МПК А62С 37/00 (2006.01). Роботизированный пожарный комплекс / Ю.И. Горбань. № 2005136627/12, заявл. 24.11.2005; опубл. 20.03.2008. Бюл. № 8.
 25. Мешман Л.М., Былинкин В.А., Горбань Ю.И., Горбань М.Ю., Фокичева К.Ю. Актуальные проблемы навигации на очаг пожара пожарных роботизированных стволов в роботизированных установках пожаротушения. Часть 1. Предпосылки создания РУП и специфические особенности тушения пожаров ПРС // Пожаровзрывобезопасность/Fire and Explosion Safety. 2019. Т. 28. № 3. С. 70–88. DOI: 10.18322/PVB.2019.28.03.70-88
 26. Иванов В. Климат не политика, не обманешь! // Сетевое издание The Moscow Post: Общероссийская общественно-политическая газета. 26.11.2021. URL: http://www.moscow-post.ru/in_world/klimat_ne_politika_ne_obmanesh37742/ (дата обращения: 31.08.2022).
 27. Пат. 2677622 РФ, МПК А62С 35/00 (2006.01). Роботизированный пожарный комплекс на базе пожарных мини-роботов-оросителей с системой удаленного доступа / Ю.И. Горбань. № 2018116814, заявл. 04.05.2018; опубл. 17.01.2019. Бюл. № 2.
 28. Пат. 2736432 РФ, МПК А62С 35/00 (2006.01), А62С 37/00 (2006.01). Роботизированная установка пожаротушения с системой предупредительного мониторинга и селективного тушения / Ю.И. Горбань, М.Ю. Горбань, С.Г. Немчинов, Д.А. Штирц, А.Э. Радаев, С.Е. Сокольников. № 2020117712, заявл. 19.05.2020, опубл. 17.11.2020. Бюл. № 32.
 29. Пат. 2128536 РФ, МПК А62С 37/00 (1995.01). Роботизированная установка пожаротушения / Ю.И. Горбань. № 97101104/12, заявл. 22.01.1997; опубл. 10.04.1999.
 30. Пат. 2739390 РФ, МПК А62С 35/00 (2006.01), А62С 37/00 (2006.01). Роботизированная установка пожаротушения с системой близмониторинга. Ю.И. Горбань, М.Ю. Горбань, Д.А. Штирц, С.Г. Немчинов. № 2020118565, заявл. 26.05.2020; опубл. 23.12.2020. Бюл. № 36.
 31. Пат. 2424837 РФ, МПК А62С 35/00 (2006.01). Роботизированный пожарный комплекс с процессной системой управления / Ю.И. Горбань. № 2010101833/12, заявл. 20.01.2010; опубл. 27.07.2011. Бюл. № 21.
 32. Пат. 2433847 РФ, МПК А62С 31/00 (2006.01), А62С 37/00 (2006.01). Роботизированный пожарный комплекс с системой технического зрения / Ю.И. Горбань. № 2010124776, заявл. 16.06.2010; опубл. 20.11.2011. Бюл. № 32.
 33. An automated fire-fighting complex integrating a television system : European patent No. 2599525, date of filing: July 14, 2011, date of publication and mention of the grant of the patent: December 30, 2015. Bulletin 2015/53.
 34. Пат. 2739820 РФ, МПК А62С 3/06 (2006.01), А62С 37/50 (2006.01). Роботизированная установка пожаротушения с системой оптимизации и контроля параметров тушения / Ю.И. Горбань, М.Ю. Горбань, Д.А. Штирц, С.Г. Немчинов. № 2020123069, заявл. 13.07.2020; опубл. 28.12.2020. Бюл. № 1.
 35. Пат. 2760650 РФ, МПК А62С 35/00 (2006.01), А62С 37/00 (2006.01). Роботизированная установка пожаротушения / Ю.И. Горбань, С.Г. Немчинов, К.Ю. Фокичева, Л.Т. Танклевский. № 2021102052, заявл. 29.01.2021; опубл. 29.11.2021. Бюл. № 34.
 36. Пат. 2775482 РФ, МПК А62С 37/00 (2006.01), А62С 3/00 (2006.01), А62С 35/58 (2006.01). Многофункциональный робототехнический комплекс предупредительного мониторинга, обнаружения возгораний и управления пожаротушением производственных объектов / В.А. Харевский, Ю.И. Горбань, С.Г. Немчинов, А.М. Бурдин, В.Ф. Гайнанов. № 2021124355, заявл. 17.08.2021; опубл. 01.07.2022. Бюл. № 19.
 37. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ 2022664536. Автоматизированная система выбора и оценки соответствия водопенных установок пожаротушения / Ю.И. Горбань, А.Г. Марахтанов, А.С. Бодрякова и др. № 2022618527, заявл. 12.05.2022; опубл. 01.08.2022.
 38. О присуждении премий Правительства Российской Федерации 2020 года в области науки и техники : Распоряжение от 22 октября 2020 года № 2736-р. URL: <http://static.government.ru/media/files/MJDPrgimP2EsE0T3HB0AwARlWquBpwV.pdf> (дата обращения: 13.09.2022).
 39. Gorban Yu.I. Fire robots // Industrial Fire Journal. 2016. No. 103. Pp. 12–13.

REFERENCES

1. SP 485.1311500.2020. Firefighting systems. Automatic fire extinguishing systems. Desig.rules and regulations : order of the EMERCOM of Russia dated August 31, 2020 No. 628. Effective date March 1, 2021. (rus).
2. Abramov V.A., Smetanin V.S. *History of fire protection. Philosophical and methodological problems of fire safety*. Moscow, SFA of EMERCOM of Russia, 2012; 26. (rus).
3. Gorban Yu.I., Sleptsova I.N., Gorban M.Yu. Robotic fire extinguishing installations — an alternative to traditional water-foam fire extinguishing systems. *Pozharnaya*

- bezopasnost/Fire safety*. 2077; 13:60-66. URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=28844563> (rus).
4. Gorban Yu.I. From sprinklers to firefighting mini robots. *Fire protection. Fire automatics. Means of rescue*. 2018:44-45. (rus).
 5. Gorban Yu.I., Tanklevskiy L.T. New technical means of fire extinguishing with water mist. *Bezopasnost/Safety: All-Russian specialized Magazine*. 2017; 4: 34-35. (rus).
 6. Author's Certificate USSR 370950, IPC A 62 C 37/04 (2000.01). *A device for aiming a fire extinguishing jet at a fire*. L.M. Meshman. No. 1488694/29-14, declar. November 2, 1970; publ. November 22, 1973. Bull. 12. (rus).
 7. Author's Certificate USSR 689683, IPC A62C37/00. *Automatic fire monitor installation for fire extinguishing*. V.M. Smirnov, Yu.V. Smirnov. No. 2513293/29-12, declar. July 29, 1977; publ. October 5, 1979. Bull. 37. (rus).
 8. Pengcheng Liu, Hongnian Yu. Faculty of science and technology, Bournemouth University, Poole BH125BB, UK. Robot-Assisted Smart Firefighting and Interdisciplinary Perspectives. *Proceedings of the 22nd International Conference on Automation & Computing, University of Essex, Colchester, UK, September 7–8, 2016*. 2016. DOI: 10.1109/ICoAC.2016.7604952
 9. Korsunskiy V. Development of firefighting robots in Russia. *Mir i bezopasnost/Peace and security*. 2007; 3:42-46. (rus).
 10. Gorban Yu.I. *Firefighting robots and fire monitors in automatic firefighting systems and fire protection*. Moscow, Pozhnauka Publ., 2013; 352. (rus).
 11. Author's Certificate USSR 1280418, IPC G 08 B 17/12 (2000.01). *Fire alarm device*. N.L. Popov, Yu.I. Gorban, A.I. Kiryanov. No. 3940038/24-24, declar. July 26, 1985; publ. December 30, 1986. Bull. 48. (rus).
 12. Author's Certificate USSR 4879274, IPC A 62 C 35/00 (2000.01). *Fire monitor*. Yu.I. Gorban, A.V. Kharitonov, T.N. Romanova, V.I. Nironen, G.N. Kudryavtsev, A.V. Mal'tsev et al. Declar. October 5, 1990; publ. June 30, 1993. (rus).
 13. Author's Certificate USSR 2050872, IPC A 62 C 35/00 (1995.01). *Fire monitor*. Yu.I. Gorban, Yu.P. Levin. No. 5007706/12, declar. October 23, 1991; publ. December 27, 1995. (rus).
 14. Patent RU 2412733, IPC A62C 31/02 (2006.01). *Fire monitor with a ball-and-socket joint*. Yu.I. Gorban. No. 2009142666/12, declar. November 18, 2009; publ. February 27, 2011. Bull. 6. (rus).
 15. Patent RU 2661324, IPC A62C 31/02 (2006.01). *Fire monitor with a ball-and-socket joint*. Yu.I. Gorban. No. 2017100578, declar. January 9, 2017; publ. July 13, 2018. Bull. 20. (rus).
 16. Patent RU 2375093, IPC A62C 31/00 (2006.01). *Fire monitor*. Yu.I. Gorban. No. 2008119740/12, declar. May 19, 2008; publ. December 10, 2009. Bull. 34. (rus).
 17. Patent RU 2373980, IPC A62C 31/00 (2006.01). *Fire monitor*. Yu.I. Gorban. No. 2008119732/12, declar. May 19, 2008; publ. November 27, 2009. Bull. 33. (rus).
 18. Patent RU 2414270, IPC A62C 31/00 (2006.01). *Fireman's automat*. Yu.I. Gorban. No. 2009146807/12, declar. December 16, 2009; publ. March 20, 2011. Bull. 8. (rus).
 19. Patent RU 2700581, IPC A62C 31/00 (2006.01). *Water-foam fire monitor; generating medium expansion foam*. Yu.I. Gorban, I.M. Abduragimov. No. 2018143189, declar. December 5, 2018; publ. September 18, 2019. Bull. 26. (rus).
 20. Patent RU 90498, ICID 29-01. *Firefighting robot*. Yu.I. Gorban. No. 2013501978, declar. May 29, 2013; publ. October 16, 2014. Bull. 10. (rus).
 21. Patent RU 124890, ICID 29-01. *Firefighting robot*. Yu.I. Gorban. No. 2020504188, declar. September 11, 2020; publ. April 20, 2021. Bull. 5. (rus).
 22. Patent RU 2699849, IPC A62C 37/00 (2006.01). *Firefighting mini robot in the ceiling version*. Yu.I. Gorban. No. 2019102082, declar. January 25, 2019; publ. September 11, 2019. Bull. 26. (rus).
 23. Patent RU 2128536, IPC A62C 37/00 (1995.01). *Robotic fire suppression system*. Yu.I. Gorban. No. 97101104/12, declar. January 22, 1997; publ. April 10, 1999. Bull. 26. (rus).
 24. Patent RU 2319530, IPC A62C 37/00 (2006.01). *Robotic fire suppression system*. Yu.I. Gorban. No. 2005136627/12, declar. November 24, 2005, publ. March 20, 2008. Bull. 8. (rus).
 25. Meshman L.M., Bylinkin V.A., Gorban Yu.I., Gorban M.Yu., Fokicheva K.Yu. Actual problems of positioning of the robotic monitors to fire area in robotic fire suppression systems. Part 1. Background to the development of RFSS and specific characteristics of the fire fighting by means of RFM. *Pozharovzryvbezopasnost/Fire and Explosion Safety*. 2019; 28(3):70-88. DOI: 10.18322/PVB.2019.28.03.70-88 (rus).
 26. Ivanov V. Climate is not politics, you can't fool it! *Online edition of The Moscow Post: All-Russian socio-political newspaper*. November 26, 2021. (rus). URL: http://www.moscow-post.ru/in_world/klimat_ne_politika_ne_obmanesh37742/ (Accessed August 31, 2022).
 27. Patent RU 2677622, IPC A62C 35/00 (1995.01). *Robotic fire suppression system based on the water mist firefighting mini robots with the remote-controlled system*. Yu.I. Gorban. No. 2018116814, declar. May 4, 2018; publ. January 17, 2019. Bull. 2. (rus).
 28. Patent RU 2736432, IPC A62C 35/00 (2006.01), A62C 37/00 (2006.01). *Robotic fire suppression system with warning monitoring and selective extinguishing system*. Yu.I. Gorban, M.Yu. Gorban, S.G. Nemchinov, D.A. Shtirts, A.E. Radaev, S.E. Sokol'nitskiy. No. 2020117712, declar. May 19, 2020; publ. November 17, 2020. Bull. 32. (rus).
 29. Patent RU 2128536, IPC A62C 37/00 (1995.01). *Robotic fire suppression system*. Yu.I. Gorban. No. 97101104/12, declar. January 22, 1997; publ. April 10, 1999. (rus).

30. Patent RU 2739390, IPC A62C 35/00 (2006.01), A62C 37/00 (2006.01). *Robotic fire suppression system with blitz monitoring*. Yu.I. Gorban, M.Yu. Gorban, D.A. Shtirts, S.G. Nemchinov. No. 2020118565, declar. May 26, 2020; publ. December 23, 2020. Bull. 36. (rus).
31. Patent RU 2424837, IPC A62C 35/00 (2006.01). *Robotic fire suppression system with a full-process control system*. Yu.I. Gorban. No. 2010101833/12, declar. January 20, 2010; publ. July 27, 2011. Bull. 21. (rus).
32. Patent RU 2433847, IPC A62C 31/00 (2006.01). *Robotic fire suppression system with computer vision system*. Yu.I. Gorban. declar. No. 2010124776, June 16, 2010; publ. November 20, 2011. Bull. 32. (rus).
33. Patent EU 2599525, IPC A62C 31/00 (2006.01), A62C 35/68 (2006.01). *An automated fire-fighting complex integrating a television system*. Yu.I. Gorban. declar. No. 11815812.0, July 14, 2011; publ. December 30, 2015. Bull. 2015/53.
34. Patent RU 2739820, IPC A62C 3/06 (2006.01), A62C 37/50 (2006.01). *Robotic fire suppression system with extinguishing optimization and parameter checkout system*. Yu.I. Gorban, M.Yu. Gorban, D.A. Shtirts, S.G. Nemchinov. No. 2020123069, declar. July 13, 2020; publ. December 28, 2020. Bull. 1. (rus).
35. Patent RU 2760650, IPC A62C 35/00 (2006.01), A62C 37/00 (2006.01). *Robotic fire suppression system*. Yu.I. Gorban, S.G. Nemchinov, K.Yu. Fokicheva, L.T. Tanklevskiy. No. 2021102052, declar. August 17, 2021; publ. November 29, 2021. Bull. 34. (rus).
36. Patent RU 2775482, IPC A62C 37/00 (2006.01), A62C 3/00 (2006.01), A62C 35/58 (2006.01). *Multifunctional robotic complex for preventive monitoring, fire detection and fire extinguishing control of industrial facilities*. V.A. Kharevskiy, Yu.I. Gorban, S.G. Nemchinov, A.M. Burdin, V.F. Gaynanov. No. 2021124355, declar. January 29, 2021; publ. July 1, 2022. Bull. 19. (rus).
37. Certificate No. 2022664536. Gorban Yu.I., Marakhtanov A.G., Bodryakova A.S. et al. *Automated system for selection and conformity evaluation of water-foam fire extinguishing systems: a computer program*. No. 2022618527, declar. May 12, 2022; publ. August 1, 2022. (rus).
38. On the awarding of prizes of the Government of the Russian Federation in 2020 in the field of science and technology : Decree of October 22, 2020 No. 2736-r. URL: <http://static.government.ru/media/files/MJDPrSgimP2EsE0T3HB0AwARIwquBpwV.pdf> (accessed September 14, 2022).
39. Gorban Yu.I. Fire robots. *Industrial Fire Journal*. 2016; 103:12-13.

Поступила 22.08.2022, после доработки 12.09.2022;
принята к публикации 20.09.2022

Received August 22, 2022; Received in revised form September 12, 2022;
Accepted September 20, 2022

Информация об авторах

ГОРБАНЬ Юрий Иванович, председатель совета директоров, главный специалист по пожарной робототехнике, Инженерный центр пожарной робототехники «ЭФЭР», Республика Карелия, 185031, г. Петрозаводск, ул. Заводская (Северная промзона р-он), 4; РИНЦ ID: 1060783; ORCID: 0000-0002-4452-6798, e-mail: info@efer.pro

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

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

Information about the authors

Yuriy I. GORBAN, Chairman of the Board of Directors, Chief Specialist in Fire Robotics, Engineering centre of fire robots technology "FR", Zavodskaya St., 4, Petrozavodsk, Republic of Karelia, 185031, Russian Federation; ID RISC: 1060783; ORCID: 0000-0002-4452-6798; e-mail: info@efer.pro

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

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

ПОЖАРОВЗРЫВБЕЗОПАСНОСТЬ/FIRE AND EXPLOSION SAFETY. 2022. Т. 31. № 5. С. 67–82
POZHAROVZRYVOBEZOPASNOST/FIRE AND EXPLOSION SAFETY. 2022; 31(5):67-82

НАУЧНАЯ СТАТЬЯ/RESEARCH PAPER

УДК 614.842

<https://doi.org/10.22227/0869-7493.2022.31.05.67-82>

Применение воздушно-механической пены для локализации и ликвидации пламенного горения проливов сжиженного природного газа

Михаил Владимирович Алешков¹, Виктор Павлович Молчанов²,
Сергей Александрович Макаров¹ ✉, Дмитрий Александрович Иощенко¹,
Алексей Владимирович Третьяков³, Владимир Вадимович Барешкин³,
Рашид Борисович Битуев¹

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

² Международный противопожарный центр, г. Москва, Россия

³ ЭГИДА ПТВ, г. Москва, Россия

АННОТАЦИЯ

Введение. Применение воздушно-механической пены для локализации и ликвидации пламенного горения проливов сжиженного природного газа является одним из наиболее оптимальных способов предотвращения дальнейшей эскалации аварии. При этом данных для нормирования основных параметров ее подачи недостаточно.

Цель работы заключается в обосновании применения воздушно-механической пены для локализации и ликвидации пламенного горения сжиженного природного газа с определением основных параметров ее подачи. Для ее достижения ставятся задачи:

- оценка пожаровзрывоопасных свойств сжиженного природного газа и анализ средств тушения его проливов;
- экспериментальное определение изолирующего действия пены различной кратности на поверхности криогенной жидкости;
- экспериментальное определение огнетушащей эффективности пены при ликвидации пламенного горения сжиженного природного газа;
- экспериментальная проверка целесообразности совместного применения высокочастотной воздушно-механической пены с порошковыми средствами пожаротушения.

Результаты и их обсуждение. По итогам обсуждения результатов собственных экспериментов с учетом зарубежного и отечественного опыта проведения таких исследований выявлено, что для локализации и ликвидации пламенного горения сжиженного природного газа целесообразно применение пены кратностью от 300 до 500 единиц. Ликвидация пламенного горения при применении пен низкой и средней кратности не происходит. Для снижения интенсификации пламенного горения СПГ требуется подача высокочастотной пены с интенсивностью, превышающей 0,08 кг/(м²·с). Для ликвидации пламенного горения целесообразно установить интенсивность подачи высокочастотной пены на уровне 0,17 ± 0,01 кг/(м²·с). Применение порошковых средств пожаротушения целесообразно для ликвидации пламенного горения сжиженного природного газа, поверхность которого уже покрыта пеной.

Выводы. На основе собственных экспериментальных данных, анализа литературных источников, с учетом известных свойств противопожарной пены обоснованы основные параметры ее подачи для локализации и ликвидации пламенного горения сжиженного природного газа.

Ключевые слова: тушение; изоляция; порошок; пенообразователь; тепловой поток

Для цитирования: Алешков М.В., Молчанов В.П., Макаров С.А., Иощенко Д.А., Третьяков А.В., Барешкин В.В., Битуев Р.Б. Применение воздушно-механической пены для локализации и ликвидации пламенного горения проливов сжиженного природного газа // Пожаровзрывобезопасность/Fire and Explosion Safety. 2022. Т. 31. № 5. С. 67–82. DOI: 10.22227/0869-7493.2022.31.05.67-82

✉ Макаров Сергей Александрович, e-mail: s17031975@rambler.ru

Using air-filled foam to contain and liquidate the flaming combustion of liquefied natural gas spills

Mikhail V. Aleshkov¹, Viktor P. Molchanov², Sergey A. Makarov¹✉, Dmitriy A. Ioschenko¹, Aleksey V. Tretyakov³, Vladimir V. Bareshkin³, Rashid B. Bituyev¹

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

² International Fire Prevention Center, Moscow, Russian Federation

³ EGIDA PTV, Moscow, Russian Federation

ABSTRACT

Introduction. Using air-filled foam to contain and liquidate the flaming combustion of liquefied natural gas spills is one of the most optimal methods of preventing the escalation of emergencies. However, the amount of data available today is insufficient to standardize the basic parameters of air-filled foam injection.

The purpose of this research project is to justify the application of air-filled foam to contain and liquidate the flaming combustion of liquefied natural gas and identify the basic parameters of injection. The following objectives are to be attained towards this end:

- assessment of the fire and explosion safety of liquefied natural gas and analysis of extinguishing means applicable to spills;
- experimental determination of the insulating ability of foams, having different expansion factors, if applied to the surface of cryogenic fluid;
- experimental determination of the fire-fighting efficiency of the foam used to liquidate the flaming combustion of liquefied natural gas;
- experimental verification of expediency of the joint application of high expansion air-filled foam and extinguishing powders.

Results and discussion. Having discussed the findings of the in-house experiments and analyzed the international and domestic tests conducted for this purpose, the authors assume that the application of the foam, whose expansion factor equals 300 to 500 units, can effectively contain and liquidate the flaming combustion of liquefied natural gas. The flaming combustion cannot be liquidated, if lower expansion factor foams are applied. The application rate of the high-expansion air-filled foam, exceeding 0.08 kg/(m²s), is required to reduce the intensity of flaming combustion. Flaming combustion can be efficiently liquidated if the application rate of high-expansion air-filled foam is set at 0.17 ± 0.01 kg/(m²s). Fire-extinguishing powders can only be efficiently applied to liquidate the flaming combustion of liquefied natural gas, if its surface is covered in foam.

Conclusions. The authors have used their in-house experimental data, analyzed the literary sources and well-known properties of the fire-extinguishing foam to justify the basic parameters of foam application aimed at the containment and liquidation of the flaming combustion of liquefied natural gas.

Keywords: extinguishing; isolation; powder; foam generating agent; heat flow rate

For citation: Aleshkov M.V., Molchanov V.P., Makarov S.A., Ioschenko D.A., Tretyakov A.V., Bareshkin V.V., Bituyev R.B. Using air-filled foam to contain and liquidate the flaming combustion of liquefied natural gas spills. *Pozharovzryvobezopasnost/Fire and Explosion Safety*. 2022; 31(5):67-82. DOI: 10.22227/0869-7493.2022.31.05.67-82 (rus).

✉ Sergey Aleksandrovich Makarov, e-mail: s17031975@rambler.ru

Введение

Применение воздушно-механической пены для локализации и ликвидации пламенного горения проливов сжиженного природного газа является одним из наиболее оптимальных способов предотвращения дальнейшей эскалации аварии. В отличие от порошковых и газовых огнетушащих составов использование пены дает возможность реализовать как технологию тушения, так и технологию контролируемого выгорания сжиженного природного газа. При этом данных для нормирования основных параметров ее подачи недостаточно. В работе на основе собственных экспериментальных данных, анализа

литературных источников, с учетом известных свойств противопожарной пены обоснованы основные параметры ее подачи для локализации и ликвидации пламенного горения сжиженного природного газа.

Актуальность создания технологии тушения локальных проливов сжиженного природного газа (СПГ) не вызывает сомнений. С 2015 г. его производство в нашей стране выросло более чем в три раза. При этом до сих пор отсутствуют нормативные документы, регламентирующие выбор и расчет соответствующих огнетушащих веществ. В начале прошлого года утвержден план мероприятий

(дорожная карта) по развитию внутреннего рынка сжиженного природного газа в Российской Федерации. Строительство автозаправочных станций СПГ будет иметь массовый характер. В ближайшие два с половиной года их количество должно вырасти в восемь раз, а суммарная установленная мощность составит более 80 т в час¹. Поэтому именно сейчас чрезвычайно остро стоит вопрос о разработке технологии локализации и ликвидации пламенного горения проливов сжиженного природного газа.

Первый свод правил по пожарной безопасности хранилищ СПГ — СП 240.1311500.2015 «Хранилища сжиженного природного газа. Требования пожарной безопасности»² вступил в действие в 2015 г., а в 2017 г. принят свод правил СП 326.1311500.2017 «Объекты малотоннажного производства и потребления сжиженного природного газа. Требования пожарной безопасности»³. В настоящее время ведется разработка нормативных документов, связанных с вопросами пожарной безопасности бункеровки водного и железнодорожного транспорта [1, 2].

Несмотря на расширение соответствующей нормативной базы, предлагаемая в настоящее время тактика тушения сжиженного природного газа не выдерживает никакой критики, тем более, что к аварийной ситуации, сопровождающейся дальнейшим воспламенением СПГ, могут привести процессы, оказывающие влияние как на устойчивость функционирования, так и на конструктивную целостность резервуаров, сосудов, аппаратов и трубопроводов [3, 4].

Специалисты в России и за рубежом оценивают возможность возникновения пожаровзрывоопасных концентраций и делают предположение, что ликвидировать горение пролива сжиженного природного газа в отдельных случаях нецелесообразно, так как это может привести к загазованности территории объекта [5–12]. Эти опасения вошли и в действующие нормативные документы. В соответствии с принятыми сводами правил: «При загорании пролитого на поверхность земли СПГ рекомендуется дать возможность ему гореть под контролем, принимая меры к перекрытию доступа газа к очагу пожара. После прекращения доступа природного газа к очагу пожара следует приступить к ликвидации возможного вторичного пожара имеющимися средствами пожаротушения. В случае крупных аварий, когда невозможно

прекратить доступ газа к очагу возникшего пожара, нецелесообразно производить тушение горящего природного газа. В этом случае необходимо защищать окружающие объекты от непосредственного воздействия очага горения водяным орошением.

Использование воды для тушения пожаров проливов СПГ не допускается, поскольку поступление воды усиливает интенсивность испарения разлившегося СПГ и, как следствие, интенсивность его горения. Тушение горящего пролива СПГ следует проводить только тогда, когда горение может привести к каскадному развитию аварии, при этом должны быть приняты меры к контролю и борьбе с загазованностью. Наиболее эффективны для тушения пожаров небольших проливов СПГ порошковые средства пожаротушения»^{2, 3}.

Таким образом, непонятно, что же нужно сделать первому РТП по прибытию к месту пожара. Приступать к тушению или нет? Если приступать к тушению, то чем? Стандарты на огнетушащие вещества и средства их подачи для тушения СПГ отсутствуют. При этом термины «имеющиеся средства пожаротушения» и «небольшие проливы СПГ» могут впоследствии быть истолкованы достаточно широко. По каким критериям первый РТП может понять, что горение не приведет к каскадному развитию аварии? Также непонятно, что необходимо предпринять, если часть поданной на орошение объекта воды попадает на место пролива СПГ и интенсифицирует горение. Если прекратить охлаждение, тогда воздействие тепла от очага пожара приведет к разрушению объекта защиты. Тогда единственным вариантом предотвращения эскалации является только тушение. И обойтись здесь порошковыми огнетушителями представляется возможным только в том случае, если их использование персоналом объекта произойдет в начальной стадии пожара. Тем более, что данные по нормативным значениям требуемого удельного расхода порошка и интенсивности его подачи также отсутствуют. Поэтому пожарным подразделениям нужно предложить конкретные варианты выполнения своей боевой задачи с применением стандартизованных огнетушащих веществ и стандартизованных средств их подачи.

¹ Об утверждении плана мероприятий («дорожной карты») по развитию рынка малотоннажного сжиженного природного газа и газомоторного топлива в Российской Федерации на период до 2025 года : Распоряжение Правительства Российской Федерации от 13.02.2021 № 350-р.

² СП 240.1311500.2015. Хранилища сжиженного природного газа. Требования пожарной безопасности.

³ СП 326.1311500.2017. Объекты малотоннажного производства и потребления сжиженного природного газа. Требования пожарной безопасности.

Рассмотрим, что же в этом направлении уже сделано за рубежом. Так, например, из самого названия европейского стандарта DIN EN 12065⁴ следует, что для тушения пожаров сжиженного природного газа предусматривается применение пены средней и высокой кратности, а также порошков. При этом огнетушащая эффективность пены оценивается возможностью локализации пожара, которая определяется по десятикратному снижению теплового излучения от горящего модельного очага площадью 50 м².

То есть технология пенного пожаротушения предусматривает возможность локализации и дальнейшего контролируемого выгорания СПГ при одновременном снижении пламенного горения и теплового потока от него. Следует отметить, что использование пены в технологии контролируемого выгорания позволяет предотвратить загазованность территории объекта, чего нельзя достичь, применяя исключительно порошковые средства тушения. К сожалению, в рассмотренном европейском стандарте отсутствуют данные о конкретной величине требуемой интенсивности, а также о составе и показателях качества используемых пенообразователей и порошков для тушения пожаров сжиженного природного газа. Из текста документа следует, что использование порошка целесообразно либо для тушения небольших проливов СПГ, либо для дотушивания пролива, покрытого пенным слоем. На наш взгляд, именно такая позиция в организации тушения СПГ является наиболее оптимальной и перспективной.

Несмотря на то, что газовые и порошковые огнетушащие составы позиционируются как основные средства тушения горючих газов [12–14], в рассмотренном европейском стандарте указывается, что эффективность порошков подтверждается только при ликвидации горения небольших проливов СПГ, а газовые огнетушащие составы не рассматриваются вообще.

Ветер и конвективные потоки, возникающие при пламенном горении сжиженного природного газа, не позволяют создать требуемую огнетушащую концентрацию в очаге горения. Высота пламени также играет свою отрицательную роль в реализации порошкового и газового пожаротушения сжиженного природного газа. В свою очередь основное или дополнительное применение воздушно-механической пены может решить вопросы, освещаемые в разработанных отечественных сводах правил, а именно: снизить тепловое излучение от очага пожара, обеспечить контролируемое выгорание СПГ, предотвратить загазованность

территории и, в случае необходимости, ликвидировать горение.

Так какая же воздушно-механическая пена наиболее эффективна для локализации и ликвидации пламенного горения сжиженного природного газа? Пена низкой, средней или высокой кратности? Какой тип пенообразователя следует применить и какие у него должны быть основные технические характеристики? Достаточно значимое количество работ по пенному тушению проливов СПГ и СУГ выполнено И.М. Абдурагимовым и Г.Н. Куприным на базе «НПО Сопот». Авторы предполагают, что при всех сценариях развития аварийной ситуации, обусловленной проливом либо истечением СПГ или СУГ (кроме варианта внезапного взрыва газозавоздушной смеси в момент истечения флюида), наиболее перспективными и целесообразными представляются попытки управления развитием аварийной ситуации с использованием комбинированных пен низкой или средней кратности. Взрывоопасные концентрации газа ликвидируются воздушно-механической пеной низкой и средней кратности из раствора синтетического углеводородного пенообразователя путем образования на поверхности СУГ и СПГ слоя пены, состоящего из тонкого, неравномерно распределенного слоя льда, к которому «прикрепляется» слой замороженной пены, над которым расположен слой мокрой незамороженной пены [15]. Исследователями также предложен способ оценки свойств противопожарной пены с использованием в качестве криогенной жидкости сжиженного азота. Несмотря на большое количество проведенных опытов, в результатах работ отсутствуют данные о требуемой интенсивности подачи пены и требуемом удельном расходе для локализации и ликвидации пламенного горения СПГ. Также следует отметить, что сжиженный метан и сжиженная пропан-бутановая смесь имеют разную температуру кипения и интенсивность испарения, а их пары — разную плотность, поэтому основные параметры пенного тушения СУГ и СПГ должны быть разными. И здесь мы опять возвращаемся к вопросу отсутствия конкретных данных об основных параметрах подачи пены для оценки возможности ее применения при тушении СПГ.

Для того чтобы разобраться со средствами тушения СПГ, нужно сначала понять, что мы тушим. Сжиженный природный газ — это горючий газ или горючая жидкость? Какой класс пожара присваивается горящему проливу СПГ? В дальнейших рассуждениях мы рассматриваем горение проливов сжиженного природного газа именно как горение

⁴ DIN EN 12065. Европейский стандарт. Установки и оборудование для сжиженного природного газа. Испытания пенообразователей, предназначенных для получения пены средней и высокой кратности, а также огнетушащих порошков, для тушения пожаров сжиженного природного газа.

горючих жидкостей с применением соответствующих средств их тушения.

Итак, сжиженный природный газ или сокращенно СПГ. В соответствии с ГОСТ Р 57431–2017⁵, современный СПГ состоит в основном из метана. Мольная доля метана составляет от 87 до 99 %. В оставшуюся часть входят этан, пропан, бутан, пентан и азот. Плотность СПГ зависит от его компонентного состава и обычно колеблется в диапазоне от 430 до 470 кг/м³, но в отдельных случаях может достигать 520 кг/м³. Вязкость СПГ зависит от состава и температуры. Вязкость СПГ в 5–10 раз меньше вязкости воды. СПГ хранят в кипящем состоянии. Поскольку СПГ является многокомпонентной смесью, составы мгновенно испарившегося газа и оставшейся жидкости отличаются.

На рис. 1 представлена зависимость, характеризующая соответствие температурных и концентрационных пределов распространения пламени СПГ, содержащего 95 % мольных долей метана. У сжиженного природного газа с таким химическим составом нижним температурным пределом распространения пламени является температура –177 °С, которая всего лишь на 5 °С выше температуры застывания.

Верхний температурный предел распространения пламени соответствует температуре –173 °С, которая на 12 °С ниже температуры кипения. Сжиженный природный газ — это кипящая горючая жидкость, над поверхностью которой образуется паровоздушное облако с концентрацией паров выше верхнего температурного предела распространения пламени [1, 5, 16]. Скорость испарения СПГ зависит от материала поверхности, на кото-

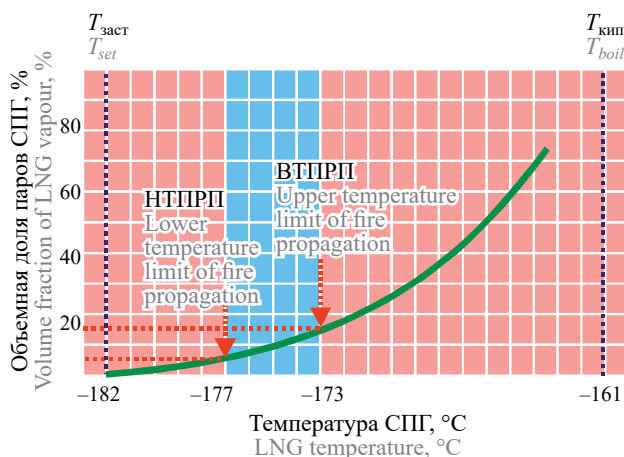


Рис. 1. Температурные пределы распространения пламени сжиженного природного газа

Fig. 1. The flame propagation temperature range of liquefied natural gas

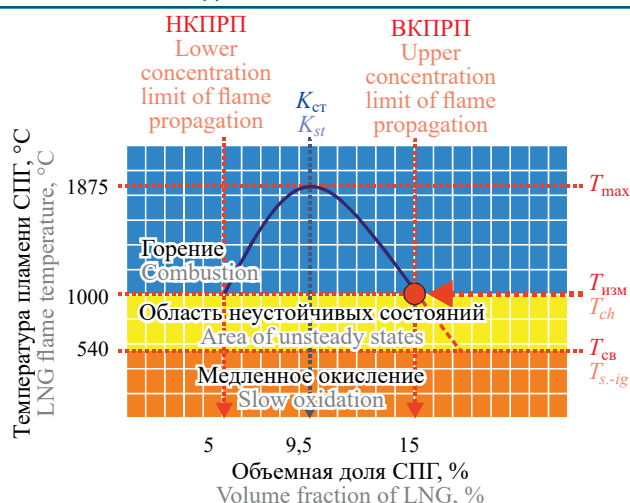


Рис. 2. Температура пламени сжиженного природного газа

Fig. 2. LNG flame temperature

рую произошел пролив. В соответствии с ГОСТ Р 57431–2017⁵ наибольшее испарение СПГ происходит с поверхности воды, скорость испарения составляет 600 кг/(м²·ч). Скорость испарения СПГ с поверхности, покрытой щебнем, составляет 480 кг/(м²·ч), а с поверхности обычного бетона — 130 кг/(м²·ч). Этот фактор учитывался в дальнейших исследованиях при определении основных параметров тушения СПГ.

Как же горит испарившийся СПГ над поверхностью пролива? Он горит так же, как горит «богатая» паровоздушная смесь при недостатке воздуха. При температуре самовоспламенения паров СПГ 540 °С температура пламени находится в районе 1000 °С (рис. 2). Высота пламени горящего СПГ является одним из основных препятствий обеспечения требуемой огнетушащей концентрации газовых и порошковых огнетушащих соста-



Рис. 3. Горение СПГ в противне площадью 1 м²

Fig. 3. LNG combustion in a 1 m² tray

⁵ ГОСТ Р 57431–2017. Газ природный сжиженный. Общие характеристики.

вов. При горении пролива СПГ на площади одного квадратного метра образуется пламя высотой более четырех метров (рис. 3).

Основным, а в отдельных случаях и единственным средством тушения, позволяющим снизить высоту пламени, является воздушно-механическая пена. Огнетушащее действие пены по классической теории основано на предотвращении доступа горючих паров и газов в зону горения и охлаждении поверхности горючей жидкости [17]. Однако, если воздушно-механическая пена применяется для ликвидации горения криогенной жидкости, то охлаждающего эффекта она не оказывает. Наоборот, чем меньше площадь пятна контакта «горячей» пены с криогенной жидкостью, тем меньше интенсификация ее испарения [1, 18]. Несмотря на это, противопожарная пена на поверхности сжиженного природного газа существенно снижает интенсив-

ность испарения и является основным средством локализации и ликвидации горения. Наилучшими противопожарными свойствами обладает пена высокой кратности, стабилизированная специальными добавками, повышающими ее устойчивость. Высокократную пену применяют как для локализации, так и для ликвидации пламенного горения проливов СПГ. Толщина пенного слоя является одним из основных критериев эффективности. При применении пены высокой кратности достигается наибольшая толщина пенного слоя [19–24].

Результаты и их обсуждение

Для оценки изолирующего действия противопожарной пены низкой, средней и высокой кратности на поверхности СПГ проведены собственные исследования с использованием в качестве крио-



Рис. 4. Проведение исследований по определению изолирующего действия воздушно-механической пены на поверхности сжиженного азота: *a* — залив сжиженного азота в противень без цилиндрического ограждения; *b* — залив сжиженного азота в противень с цилиндрическим ограждением; *c* — выдержка сжиженного азота в противне без цилиндрического ограждения; *d* — выдержка сжиженного азота в противне с цилиндрическим ограждением; *e* — подача пены низкой кратности; *f* — подача пены средней кратности без принудительного наддува воздуха; *g* — подача пены средней кратности с принудительным наддувом воздуха; *h* — подача пены высокой кратности с принудительным наддувом воздуха; *i* — промерзшая пена низкой кратности на поверхности сжиженного азота через 60 с после прекращения подачи

Fig. 4. Testing the insulation ability of the air-filled foam on the surface of liquefied nitrogen: *a* — pouring liquefied nitrogen on a tray that has no cylinder-shaped enclosure; *b* — pouring liquefied nitrogen on a tray that has cylinder-shaped enclosure; *c* — conditioning of liquefied nitrogen on a tray that has no cylinder-shaped enclosure; *d* — conditioning of liquefied nitrogen on a tray that has cylinder-shaped enclosure; *e* — application of low expansion foam; *f* — application of medium expansion foam without boost air charging; *g* — application of medium expansion foam accompanied by boost air charging; *h* — application of high expansion foam accompanied by boost air charging; *i* — frozen low expansion foam on the surface of liquefied nitrogen 60 seconds after the termination of foam application

генной жидкости сжиженного азота (рис. 4). Пена приготавливалась на основе пенообразователей различных типов. Сущность методики заключается в определении величины интенсивности испарения сжиженного азота до и после покрытия его поверхности пеной. При проведении исследований использованы лабораторные пеногенераторы низкой, средней и высокой кратности. Расход рабочего раствора из пеногенераторов составлял 30 ± 3 г/с. Получение пены низкой кратности производилось без принудительного наддува воздуха.

Получение пены средней кратности производилось как без принудительного наддува воздуха, так и с принудительным наддувом воздуха. Получение пены высокой кратности производилось только с принудительным наддувом воздуха. Для исследований изолирующей эффективности пены использовался металлический противень круглой формы диаметром 500 мм и высотой стенки 200 мм. При исследованиях пены средней и высокой кратности на противень устанавливалось цилиндрическое ограждение, высотой 500 мм, изготовленное из металлической сетки. Указанное ограждение не позволяло пене растекаться за границы стенок противня и обеспечивало нахождение пены непосредственно над поверхностью сжиженного азота. Сжиженный азот доставлялся к месту проведения работ в сосудах Дьюара объемом 50 л. Для удобства доставки и налива сжиженного азота в металлический противень использовалось передвижное опорно-поворотное устройство, позволяющее перевозить сосуд Дьюара и обеспечивать его расположение над противнем с необходимым углом наклона во время перелива азота в противень. Измерение массы испарившегося азота производилось на электронных весах с пределом взвешивания 41 кг, точностью 1 г с выводом и фиксацией результатов измерений на персональный компьютер в режиме реального времени. Поверхность грузоподъемной платформы весов для установки противня покрыта теплоизоляционным материалом. Исследования по определению изолирующего действия пены на поверхности криогенной жидкости выполнялись в следующей последовательности. Металлический противень устанавливался на платформу весов, и производился перелив сжиженного азота из сосуда Дьюара в противень. Высота свободного борта составляла 100 ± 10 мм. Время выдержки сжиженного азота в металлическом противне с момента окончания налива до начала подачи пены составляло 65 ± 5 с. В течение этого времени стабилизировалась интенсивность испарения сжиженного азота, величина которой составляла $0,06 \pm 0,01$ кг/(м²·с). Затем поверхность сжиженного азота покрывалась воздушно-механической пеной и в течение 60 с, после пре-

ращения ее подачи, измерялась интенсивность испарения. Проникновение паров криогенной жидкости через пенный слой в режиме реального времени визуально наблюдали при помощи тепловизора с выводом на экран персонального компьютера.

По результатам измерений установлено, что величина интенсивности испарения с поверхности азота, покрытой пеной низкой кратности, находилась в диапазоне от 0,021 до 0,032 кг/(м²·с). Кратность пены составляла от 8 до 19 единиц. Величина интенсивности испарения с поверхности, покрытой пеной средней кратности, находилась в диапазоне от 0,008 до 0,015 кг/(м²·с). Кратность составляла от 42 до 125 единиц. Величина интенсивности испарения с поверхности, покрытой пеной высокой кратности, находилась в диапазоне от 0,0023 до 0,0044 кг/(м²·с). Кратность пены составляла от 212 до 535 единиц. В результате проведенных исследований на сжиженном азоте установлено, что кратность пены и тип пенообразователя играют существенную роль в изолирующем действии пен на поверхности криогенной жидкости. При этом пенообразователи с высокими показателями огнетушащей эффективности н-гептана и бензина не всегда показывают соответствующую изолирующую способность на поверхности криогенной жидкости. Наименьшее парообразование наблюдалось при покрытии поверхности криогенной жидкости пеной высокой кратности [1, 18]. Интересно поведение пены низкой кратности на поверхности сжиженного азота. Подача пены низкой кратности сначала интенсифицирует испарение криогенной жидкости, однако уже через 20–30 с нижние слои пены промерзают и газообразование существенно снижается, затем замерзшая воздушно-механическая пена низкой кратности погружается в сжиженный азот. Контакт пены средней и высокой кратности с криогенной жидкостью вызывает краткосрочное повышение интенсификации испарения с последующим существенным снижением и долгим изолирующим эффектом.

Выполненные исследования по определению изолирующего действия пены внесли некоторую ясность в вопросах, связанных с пенным пожаротушением криогенных жидкостей. Одно из главных существующих сомнений возможности применения пены было связано с большой разницей температур между рабочим раствором пенообразователя и СПГ, а также предположением, что подача пены существенно интенсифицирует кипение и может привести к мгновенному фазовому переходу из жидкости в газ. Несмотря на то, что температура кипения сжиженного азота на 35 °С ниже температуры кипения сжиженного природного газа, при проведении



Рис. 5. Доставка сжиженного природного газа к месту проведения испытаний: *a* — автомобильный криогенный топливный бак; *b* — сосуд Дьюара с сжиженным азотом и сосуд Дьюара для СПГ, установленный на передвижном опорно-поворотном устройстве; *c* — залив сжиженного азота для охлаждения сосуда Дьюара; *d* — слив сжиженного азота; *e* — заполнение сосуда Дьюара СПГ; *f* — охлаждение модельного противня сжиженным азотом; *g* — перевозка СПГ от криогенного топливного бака к модельному противню; *h* — наполнение противня площадью 1 м² СПГ из одного сосуда Дьюара; *i* — наполнение противня площадью 2 м² СПГ из двух сосудов Дьюара

Fig. 5. Delivery of liquefied natural gas to the testing site; *a* — car-mounted cryogenic fuel tank; *b* — Dewar's flask that has liquefied nitrogen and Dewar's flask for LNG on a mobile rotary support; *c* — pouring of liquefied nitrogen needed to cool the Dewar's flask; *d* — discharging of liquefied nitrogen; *e* — filling the Dewar's flask with LNG; *f* — using liquefied nitrogen to cool the standard tray; *g* — transporting LNG from the cryogenic fuel tank to the standard tray; *h* — filling the 1 m² tray with LNG from one Dewar's flask; *i* — filling the 2 m² tray with LNG from two Dewar's flasks

исследований подобные процессы не возникали. Экспериментальное определение изолирующего действия пены на поверхности криогенной жидкости выявило, что при применении пены высокой кратности имеется возможность предотвращения испарения СПГ, необходимого для поддержания пламенного горения. Тем не менее окончательно убедиться в эффективности пенного пожаротушения сжиженного природного газа было возможно только после проведения соответствующих огневых тестов.

Большое количество работ при подготовке к огневым испытаниям было связано с оценкой характеристик используемого испытательного оборудования и поиском способа доставки сжиженного природного газа к месту проведения эксперимента. Определенные трудности возникали во время перевозки и налива СПГ в модельный противень (рис. 5).

Было решено, что оптимальный вариант доставки СПГ может быть реализован при помощи

сосудов Дьюара объемом 50 л, устанавливаемых на передвижных опорно-поворотных устройствах. При этом перед наливом СПГ в сосуды Дьюара и сливом в противень они должны быть предварительно охлаждены сжиженным азотом. Все это позволяло снизить испарение СПГ до его поджига. Заполнение сосудов Дьюара СПГ производилось из автомобильного криогенного топливного бака объемом 1 м³. Переливной клапан криогенного бака был заменен на патрубок с аналогичной резьбой. К патрубку присоединено наливочное устройство, представляющее собой теплоизолированный рукав длиной 1,5 м с трубкой длиной 0,5 м. Трубка должна засовываться в горловину сосуда Дьюара. Трубка заглушена на конце и имеет в нижней части шесть отверстий для слива СПГ. При проведении испытаний с модельными очагами площадью более 1 м² использовался не один, а два сосуда Дьюара с двумя передвижными опорно-поворотными устройствами.

При проведении огневых испытаний все действия операторов выполнялись строго по команде руководителя испытаний. Огневые испытания по тушению СПГ производились в следующей последовательности. Передвижные опорно-поворотные устройства с сосудами Дьюара устанавливаются около криобака на расстоянии, позволяющем полностью погрузить трубку наливного устройства в сосуд Дьюара. Производится охлаждение сосудов Дьюара сжиженным азотом. Для этого сжиженный азот заливается в сосуды Дьюара и сливается. Трубка наливного устройства вставляется в горловину сосуда Дьюара. Открывается запорный клапан криобака. После начала разбрызгивания каплей СПГ из горловины сосуда Дьюара трубка наливного устройства поднимается на высоту 0,1 м. После очередного разбрызгивания каплей СПГ трубка наливного устройства поднимается еще на 0,1 м. Данная операция повторяется 3 раза до высоты 0,3 м от дна сосуда. После заполнения сосуда Дьюара СПГ закрывается запорный клапан криобака. При необходимости аналогичным образом заправляется второй сосуд Дьюара. По команде руководителя испытаний в модельный очаг заливается жидкий азот. Налив жидкого азота прекращается, когда им покрыто дно модельного очага. Передвижные опорно-поворотные устройства с сосудами Дьюара перемещаются к модельному очагу. Для налива СПГ из сосуда Дьюара в модельный очаг передвижное опорно-поворотное устройство устанавливается вплотную к модельному очагу. Налив производится постепенным наклоном сосуда Дьюара до полного переворота горловиной вниз. В случае использования в эксперименте двух сосудов Дьюара, налив из них производится по очереди. Передвижные опорно-поворотные устройства с пустыми сосудами Дьюара отвозятся на расстояние не менее 30 м от модельного очага. Во время налива оператор тушения находится с наветренной стороны от очага на расстоянии не менее 5 м. Количество сжиженного природного газа для проведения одного эксперимента составляет 50 литров на один квадратный метр площади модельного очага. Производится поджиг СПГ в модельном очаге. Факел, которым производится поджиг, должен подноситься к очагу с подветренной стороны. Время свободного горения отсутствует. По команде руководителя тушение начинается сразу с готовностью оператора к тушению. После окончания тушения проводится повторный поджиг модельного очага. Фиксируется время догорания оставшегося СПГ. При определении огнетушащей эффективности воздушно-механической пены применялись стандартные пеногенераторы, изготовленные в соответствии

с требованиями ГОСТ Р 50588–2012⁶, и сжиженный природный газ, содержащий 95 % мольных долей метана.

Для предварительной оценки различий в результативности ликвидации пламенного горения СПГ среди пен низкой, средней и высокой кратности принято решение провести серию экспериментов с фиксированной интенсивностью подачи пены, приготовленной на основе пенообразователей, с уже исследованной изолирующей эффективностью. Подача производилась из насосной установки с мерной емкостью для рабочего раствора пенообразователя объемом 110 л и водяным насосом, изготовленными в соответствии с п. 5.3.1 ГОСТ Р 50588–2012⁶. Рабочий раствор пенообразователя приготавливался заранее. Температура воды для приготовления рабочих растворов составляла $(20 \pm 2)^\circ\text{C}$. При подаче пены кратностью 12...14 единиц использовались ствол пены низкой кратности по п. 5.3.1 ГОСТ Р 50588–2012⁶, обеспечивающий расход рабочего раствора $(0,166 \pm 0,001) \text{ дм}^3/\text{с}$, и круглый противень диаметром 1190 мм, высотой 300 мм. При подаче пены кратностью 62...65 единиц использовались ствол пены средней кратности по п. 5.6.1 ГОСТ Р 50588–2012⁶, обеспечивающий расход рабочего раствора $(0,055 \pm 0,003) \text{ дм}^3/\text{с}$, и круглый противень диаметром 700 мм, высотой 300 мм. При подаче пены кратностью 350...360 единиц использовались генератор пены высокой кратности по п. 5.7.1 ГОСТ Р 50588–2012⁶, обеспечивающий расход рабочего раствора $(0,102 \pm 0,002) \text{ дм}^3/\text{с}$, и круглый противень диаметром 920 мм, высотой 300 мм. Таким образом, для пен низкой, средней и высокой кратности обеспечивалась интенсивность подачи, соответствующая значению $0,15 \text{ кг}/(\text{м}^2 \cdot \text{с})$.

Последовательность проведения экспериментов была аналогична последовательности, описанной в п. 5.4, п. 5.6 и п. 5.7 ГОСТ Р 50588–2012⁶, для пен низкой, средней и высокой кратности соответственно. Каждый эксперимент повторялся три раза.

В процессе проведения испытаний ликвидировать пламенное горение СПГ пеной низкой и средней кратности, приготовленной на основе различных пенообразователей, не удалось. Тушение пеной высокой кратности оказалось успешным только при использовании пенообразователя с наилучшей изолирующей эффективностью.

Окончательно убедиться в том, что кратность пены играет одну из ключевых ролей в эффективности пенного пожаротушения СПГ, нам позволили эксперименты с использованием ствола ГПС-100 с характеристиками по п. 5.3.1 ГОСТ Р 50588–2012⁶.

⁶ ГОСТ Р 50588–2012. Пенообразователи для тушения пожаров. Общие технические требования и методы испытаний.



Рис. 6. Подача пены средней кратности из ствола ГПС-100
Fig. 6. Application of medium expansion foam using GPS-100 pipe

Конфигурация испытательного оборудования со стволом ГПС-100 по п. 5.3.1 ГОСТ Р 50588–2012⁶ и противнем диаметром 1190 мм, высотой 300 мм (рис. 6) позволила обеспечить интенсивность подачи пены $0,9 \text{ кг}/(\text{м}^2 \cdot \text{с})$. Кратность пены составляла 64...65 единиц. Несмотря на шестикратное увеличение интенсивности, ликвидировать пламенное горение СПГ при помощи ствола ГПС-100 также не удалось.

В дальнейших экспериментах по определению времени тушения от интенсивности подачи пены применялась только пена высокой кратности (рис. 7). За показатель «время тушения» принимался промежуток времени с момента подачи пены до момента прекращения пламенного горе-

ния. В качестве модельных очагов использованы круглые противни, изготовленные из нержавеющей стали, аналогичные тем, которые применялись в предыдущих экспериментах. Площадь противней составляла от $0,45$ до $2,0 \text{ м}^2$ с высотой борта 300 мм . Сжиженный природный газ из таких очагов испарялся с интенсивностью от $0,033$ до $0,038 \text{ кг}/(\text{м}^2 \cdot \text{с})$, что соответствовало скорости испарения СПГ, пролитого на поверхность бетона. При проведении экспериментов на модельных очагах площадью более $1,5 \text{ м}^2$ применялся экран для сбора пены высокой кратности по п. 5.7.1 ГОСТ Р 50588–2012⁶, изготовленный из сетки с размером ячейки в свету 8 мм . Генератор пены высокой кратности изготовлен в соответствии с требованиями п. 5.7.1 ГОСТ Р 50588–2012⁶.

Перед проведением экспериментов по тушению производилась калибровка пеногенератора по кратности и расходу рабочего раствора. При помощи регулировки давления на насосе и оборотов электровентилятора обеспечивалось получение пены кратностью от 290 до 1000 единиц, при расходе рабочего раствора от $0,09$ до $0,14 \text{ дм}^3/\text{с}$. Определение кратности пены производилось в соответствии с п. 5.3 ГОСТ Р 50588–2012⁶.

На рис. 8 представлен график экспериментальных данных, характеризующих время тушения сжиженного природного газа от интенсивности подачи пены. Исследовано четыре диапазона кратности: от 950 до 1000, от 730 до 760, от 490 до 510 и от 290 до 310 единиц. В результате образовалась область значений, позволяющая оценить возможность

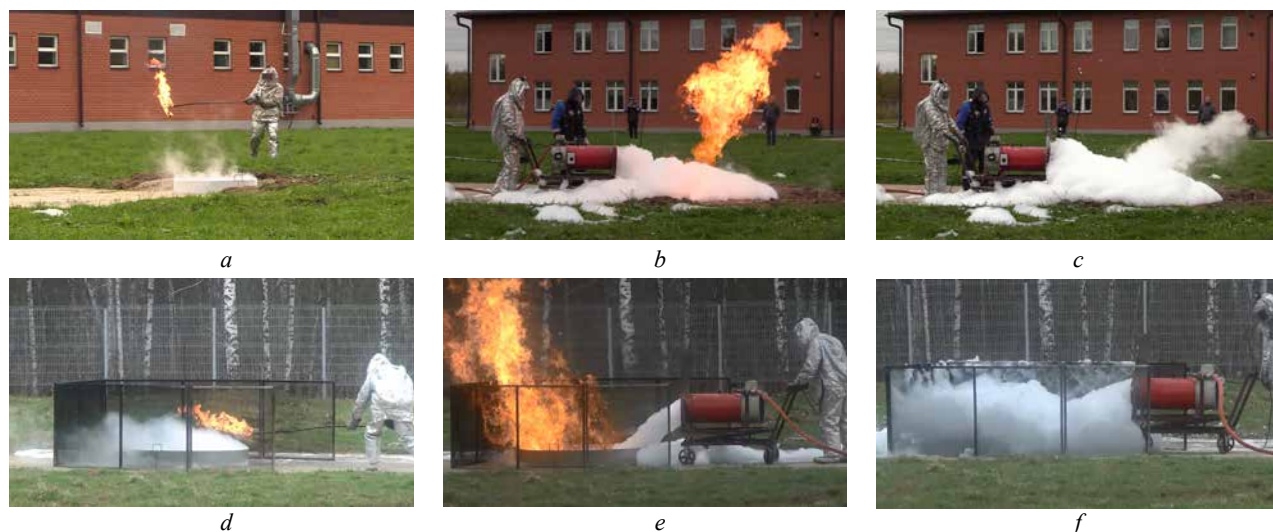


Рис. 7. Тушение сжиженного природного газа высокочратной пеной: *a* — поджиг СПГ в противне площадью 1 м^2 ; *b* — подача пены на поверхность горящего СПГ в противне площадью 1 м^2 ; *c* — ликвидация пламенного горения СПГ в противне площадью 1 м^2 ; *d* — поджиг СПГ в противне площадью 2 м^2 ; *e* — подача пены на поверхность горящего СПГ в противне площадью 2 м^2 ; *f* — ликвидация пламенного горения СПГ в противне площадью 2 м^2

Fig. 7. Using high expansion foam to extinguish LNG: *a* — LNG ignition in a 1 м^2 tray; *b* — foam application to the surface of burning LNG in a 1 м^2 tray; *c* — liquidation of flaming combustion of LNG in a 1 м^2 tray; *d* — LNG ignition in a 2 м^2 tray; *e* — foam application to the surface of burning LNG in a 2 м^2 tray; *f* — liquidation of flaming combustion of LNG in a 2 м^2 tray

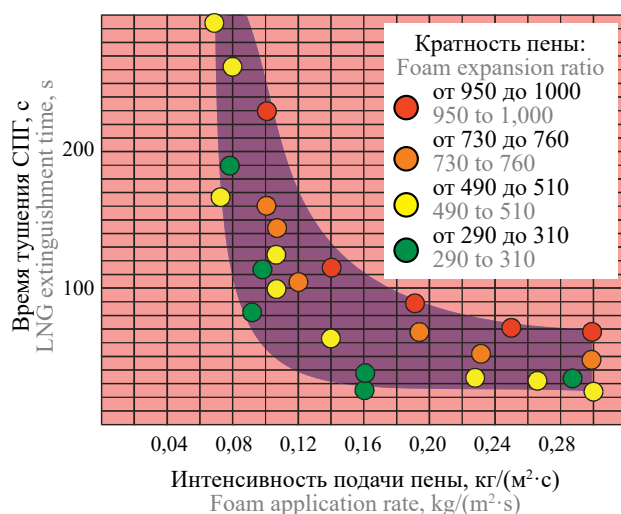


Рис. 8. Время тушения СПГ от интенсивности подачи пены
Fig. 8. Dependence of LNG extinguishment time on the foam application rate

применения той или иной кратности пены. Зависимость имеет традиционный вид экспоненциальных кривых с вертикальной асимптотой, соответствующей критической интенсивности подачи пены, характеризующей пенное пожаротушение горючих жидкостей. При повышении интенсивности подачи пены время тушения снижается. Критическая интенсивность при тушении СПГ в 2–3 раза превышает критическую интенсивность подачи пены для тушения пожаров нефти и нефтепродуктов.

Представленный график свидетельствует о целесообразности применения для тушения СПГ пены кратностью от 300 до 500 единиц. Пена кратностью 1000 единиц оказалась менее эффективна. Прежде всего это объясняется низкой плотностью и высокой вязкостью пены. Из графика видно, что для снижения интенсификации пламенного горения СПГ требуется подача высокократной пены с интенсивностью, превышающей значение $0,08 \text{ кг}/(\text{м}^2 \cdot \text{с})$. Для тушения пролива СПГ целесообразно устано-

вить интенсивность подачи пены на уровне $0,17 \pm 0,01 \text{ кг}/(\text{м}^2 \cdot \text{с})$.

В процессе проведения экспериментов по определению огнетушащей эффективности высокократной пены выполнена оценка возможности применения порошковых средств пожаротушения для дотушивания остаточного горения от поверхности пенного слоя. На рис. 9 показана подача пены кратностью 300 единиц из воздушно-пенного огнетушителя в противень площадью 2 м^2 . Расход рабочего раствора составлял $0,1 \text{ л/с}$, а интенсивность подачи пены — $0,05 \text{ кг}/(\text{м}^2 \cdot \text{с})$. После покрытия поверхности СПГ пеной модельный очаг дотушивался порошком из порошкового огнетушителя с расходом порошка 2 кг/с (рис. 10).

Следует отметить, что без предварительного покрытия поверхности СПГ пеной тушение этого очага таким же порошковым огнетушителем не происходит.

Таким образом, совместное применение порошка и воздушно-механической пены является целесообразным. Высота пламени СПГ, которая затрудняет образование требуемой огнетушащей концентрации порошка в очаге горения, снижается. Пенный слой сужает границы области пламенного горения СПГ, поэтому ликвидация горения огнетушащим порошком происходит даже в том случае, если предварительная подача пены производится с интенсивностью ниже критической.

Полученные результаты исследований свидетельствуют, что цель, поставленная в работе, была достигнута. Применение воздушно-механической пены для тушения пожаров сжиженного природного газа считается целесообразным. Полученные конкретные значения характеризуют основные параметры подачи высокократной пены для тушения СПГ. При регулировании интенсивности подачи высокократной пены появляется возможность ее применения как для локализации, так и для ликвидации пламенного горения СПГ. Ключевую роль



Рис. 9. Подача пены из воздушно-пенного огнетушителя
Fig. 9. Foam application through an air-foam fire extinguisher



Рис. 10. Подача порошка из порошкового огнетушителя для дотушивания горящей поверхности СПГ, покрытой пеной
Fig. 10. Powder application through a powder fire extinguisher to completely extinguish the burning surface of LNG covered in foam

в эффективности тушения играют состав и свойства используемого пенообразователя. Приготовленная на его основе пена должна обладать высоким изолирующим действием. Наилучшую эффективность тушения показывает воздушно-механическая пена кратностью от 300 до 500 единиц. Следует особо отметить, что огневые испытания проведены в металлических противнях, в которых интенсивность испарения СПГ составляла от 0,033 до 0,038 кг/(м²·с), что соответствует скорости испарения СПГ, пролитого на поверхность бетона. Поэтому ликвидировать пламенное горение СПГ, пролитого на иную поверхность (песок, земля, гравий и т.д.), с параметрами подачи пены, указанными в данной статье, не представляется возможным. И это еще одна область для будущих исследований, которые предстоит выполнить. Одной из положительных сторон выполненной работы является подтверждение возможности использования в экспериментах стандартизованного испытательного оборудования. Также отработан процесс доставки криогенной жидкости к месту проведения огневых испытаний, что вызывает наибольшую сложность при проведении подобного рода исследований.

На наш взгляд, для реализации технологии контролируемого выгорания СПГ в тех случаях, когда будет затруднительно применение пены высокой кратности, возможно применение пены средней кратности. Например, при сильном ветре. Для этого потребуются проведение дополнительных экспериментов, позволяющих оценить величину снижения теплового потока в зависимости от интенсивности подачи пены средней кратности. Для оценки огнетушащей эффективности пены в будущих работах предлагается сделать два подхода. Первый подход традиционный: когда огнетушащая эффективность определяется по зависимости времени тушения от интенсивности подачи пены. Второй подход подразумевает определение времени достижения определенной величины теплового потока от интенсивности подачи пены. При оценке огнетушащей эффективности пенообразователей целесообразно использовать первый подход. А для определения эффективности пены, предназначенной для реализации технологии контролируемого выгорания, — второй подход. Второй подход также рационально применять для оценки эффективности пен различной кратности, применяемых для локализации пожара. Также предлагается обсудить вопрос об отказе применения пены низкой кратности для локализации пламенного горения СПГ. На наш взгляд, применение пены низкой кратности нецелесообразно. Даже при использовании пенообразователя с высокими техническими характеристиками пена низкой кратности является недостаточно

сухой, чтобы предотвратить контакт сжиженного природного газа с нижними слоями пены, обводненными рабочим раствором. Поэтому пена низкой кратности будет обладать низким изолирующим действием и низкой способностью предотвращать доступ горючих паров и газов в зону горения.

Совместное применение средств порошкового и пенного пожаротушения позволяет повысить надежность ликвидации пламенного горения сжиженного природного газа. В случае, если поверхность горящего СПГ уже покрыта высокочрезмерной пеной, порошок может быть эффективно использован для догущивания остаточного горения поверхности пенного слоя. Проведенные собственные исследования подтверждают возможность применения порошка и пены высокой кратности. Для оценки возможности применения порошка и пены средней кратности потребуются проведение дополнительных исследований.

Заключение

Проведенный анализ литературных источников свидетельствует, что основными средствами тушения проливов сжиженного природного газа являются порошки и воздушно-механическая пена. Для разработки технологии тушения сжиженного природного газа по совокупности его пожаровзрывоопасных свойств необходимо рассматривать горение и тушение сжиженного природного газа как горение и тушение горючей жидкости. При проведении собственных исследований использовалась методика определения изолирующего действия пены на поверхности криогенной жидкости и методика определения ее огнетушащей эффективности. Сущность методики определения изолирующего действия пены заключается в расчете изменения величины интенсивности испарения криогенной жидкости в металлическом противне до и после покрытия ее поверхности пеной. В качестве криогенной жидкости применялся сжиженный азот. Измерение количества испарившегося азота производилось весовым способом. Сущность методики определения огнетушащей эффективности заключается в определении времени тушения сжиженного природного газа в модельном противне от интенсивности подачи пены. За время тушения принимался промежуток времени с момента начала подачи пены до момента прекращения пламенного горения сжиженного природного газа. Изменение интенсивности подачи пены производилось за счет использования модельных противней различной площади и регулирования расхода рабочего раствора пенообразователя. При проведении испытаний по определению огнетушащей эффективности пены отработан порядок доставки сжиженного при-

родного газа к месту проведения испытаний. Для оценки целесообразности совместного применения пены с порошковыми средствами пожаротушения производилась подача порошка для ликвидации горения на поверхности сжиженного природного газа, покрытой и непокрытой слоем пены.

Экспериментальные исследования по определению изолирующего действия пены и времени тушения от интенсивности подачи пены свидетельствуют о наибольшей эффективности высократных пен по сравнению с пенами средней и особенно низкой кратности. Установлено, что состав и свойства используемого пенообразователя играют ключевую роль в изолирующей способности пены на поверхности криогенной жидкости. По итогам обсуждения результатов собственных экспериментов с учетом международного и отечественного опыта проведения подобных исследований выявлено, что для локализации и ликвидации пламенного горения сжиженного природного газа целесообразно применение пены кратностью от 300 до 500 единиц. Применение порошковых средств пожаротушения целесообразно для ликвидации пламенного горения сжиженного природного газа, поверхность которого уже покрыта пеной. Порошок также может быть использован для дотушивания остаточного горения поверхности пенного слоя при невозможности обеспечить требуемую интенсивность подачи высократной пены.

Выводы

1. В результате оценки пожаровзрывоопасных свойств сжиженного природного газа установлена возможность локализации и ликвидации его

пламенного горения с использованием огнетушащих веществ, эффективность применения которых доказана для тушения пожаров горючих жидкостей. Такими огнетушащими веществами являются порошки и воздушно-механическая пена.

2. Экспериментальное определение изолирующего действия пены различной кратности на поверхности криогенной жидкости выявило, что при применении пены высокой кратности имеется возможность предотвращения испарения СПГ, необходимого для поддержания пламенного горения.

3. Экспериментальное определение времени тушения сжиженного природного газа от интенсивности подачи пены показывает, что ликвидация пламенного горения при применении пен низкой и средней кратности не происходит.

4. Для снижения интенсификации пламенного горения СПГ рекомендуется подача высократной пены с интенсивностью, превышающей $0,08 \text{ кг}/(\text{м}^2 \cdot \text{с})$. Для ликвидации пламенного горения целесообразно установить интенсивность подачи высократной пены на уровне $0,17 \pm 0,01 \text{ кг}/(\text{м}^2 \cdot \text{с})$.

5. Совместное применение порошка и воздушно-механической пены целесообразно. Высота пламени СПГ затрудняет образование требуемой огнетушащей концентрации порошка в очаге горения. Пенный слой существенно снижает высоту пламени и таким образом сужает геометрические границы области пламенного горения. Поэтому тушение СПГ порошком происходит даже в том случае, если предварительная подача высократной пены производится с интенсивностью ниже критической.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Алешков М.В., Молчанов В.П., Бастриков Д.Л., Макаров С.А., Третьяков А.В., Иощенко Д.А. Перспективы научных исследований свойств воздушно-механической пены для локализации и ликвидации горения разливов сжиженного природного газа // Пожары и чрезвычайные ситуации: предупреждение, ликвидация. 2022. № 1. С. 12–20. DOI: 10.25257/FE.2022.1.12-20
2. Молчанов В.П., Бастриков Д.Л., Молчанов М.В. Пожарная безопасность при использовании газомоторного топлива. Анализ текущего состояния нормативной базы // Эковестник. 2019. № 3. URL: <https://ekovestnik.ru/article/386654/>
3. Сафонов В.С. Проблемы обеспечения безопасности объектов сжиженного природного газа. Ч. I. Режимно-технологические особенности систем хранения и отгрузки сжиженного природного газа. М. : ВНИИГАЗ, 2021. 318 с.
4. Сафонов В.С. Проблемы обеспечения безопасности объектов сжиженного природного газа. Ч. II. Современные подходы к моделированию аварийных процессов и их последствий на объектах производства, хранения и перевозки сжиженного природного газа. М. : ВНИИГАЗ, 2021. 442 с.
5. Рачевский Б.С. Сжиженные углеводородные газы. М. : Нефть и газ, 2009. 640 с.
6. Болодьян И.А., Молчанов В.П., Дешевых Ю.И., Шебеко Ю.Н., Некрасов В.П., Макеев В.И. и др. Пожаровзрывобезопасность объектов хранения сжиженного природного газа. Анализ состояния проблемы // Пожарная безопасность. 2000. № 2. С. 86–96.
7. Chan S.T. Numerical simulations of LNG vapor dispersion from a fenced storage area // Journal of Hazardous Materials. 1992. Vol. 30. Issue 2. Pp. 195–224. DOI: 10.1016/0304-3894(92)85078-F
8. Brown T.C., Cederwall R., Chan S., Ermak D., Koopman R., Lamson K. et al. Falcon series data report: 1987 LNG vapor barrier verification field trials. Law-

- rence Livermore National Laboratory, 1990. 665 p. DOI: 10.2172/6633087
9. Шебеко Ю.Н., Филиппов В.Н., Навценя В.Ю., Костюхин А.К., Токарев П.М., Замышевский Э.Д. Способы противопожарной защиты резервуаров со сжиженными углеводородными газами // Пожаровзрывобезопасность/Fire and Explosion Safety. 1999. Т. 8. № 4. С. 33–42.
 10. Kamperveen J.P., Spruijt M.P.N., Reinders J.E.A. TNO 2016 R10352. Heat load resistance of cryogenic storage tanks. Results of LNG Safety Program. Utrecht, TNO, 2016. 70 p.
 11. Zang Qian-xi, Liang Dong. Thermal radiation and impact assessment of the LNG BLEVE fireball // Procedia Engineering. 2013. Vol. 52. Pp. 602–606. DOI: 10.1016/j.proeng.2013.02.192
 12. Тагиев Р.М. Первые в мировой практике ширококомасштабные испытания по проливу сжиженного природного газа и последующего его горения в рамках научно-технического сотрудничества ООО «Газпром газобезопасность» и «GDF Suez S.A.» // Безопасность объектов топливно-энергетического комплекса. 2013. № 2. С. 58–61.
 13. Корольченко А.А., Корольченко Д.А. Пожаровзрывоопасность веществ и материалов и средства их тушения : справочник : в 2 ч. 2-е изд., перераб. и доп. Ч. I. М. : Пожнаука, 2004. 713 с.
 14. Корольченко А.А., Корольченко Д.А. Пожаровзрывоопасность веществ и материалов и средства их тушения : справочник : в 2 ч. 2-е изд., перераб. и доп. Ч. II. М. : Пожнаука, 2004. 774 с.
 15. Абдурагимов И.М., Куприн Г.Н. Нерешенные проблемы пожаровзрывобезопасности энергоресурсов (СУГ и СПГ) как оборотная сторона успехов энергетической стратегии Российской Федерации // Пожаровзрывобезопасность/Fire and Explosion Safety. 2014. Т. 23. № 4. С. 42–49. URL: <https://elibrary.ru/item.asp?id=21519968>
 16. Шебеко Ю.Н., Навценя В.Ю., Копылов С.Н., Горшков В.И., Корольченко И.А., Полетаев А.Н. и др. Расчет основных показателей пожаровзрывоопасности веществ и материалов : руководство. М. : ВНИИПО, 2002. 77 с.
 17. Шароварников А.Ф., Шароварников С.А. Пенообразователи и пены для тушения пожаров. Состав, свойства, применение. М. : Пожнаука, 2005. 335 с.
 18. Фещенко А.Н., Макаров С.А., Третьяков А.В., Григорьевская И.И., Битиев Р.Б. Исследование изолирующего действия противопожарной пены на поверхности криогенной жидкости // Проблемы техносферной безопасности — 2022 : сб. тр. XI Междунар. науч.-практ. конф. мол. уч. и спец. М. : Академия ГПС МЧС России, 2022. С. 232–238. URL: <https://elibrary.ru/item.asp?id=48545816>
 19. Yang Jie, Li Yuxing, Zhu Jianlu, Han Hui. Quantitative study of the factors of LNG liquid foam stability: Operating parameters and collection containers and time // Process Safety and Environment Protection. 2018. Vol. 117. Pp. 223–231. DOI: 10.1016/j.psep.2018.05.005
 20. Krishnan P., Al-Rabbat A., Zhang B., Huang D., Zhang L., Minxiang Zeng et al. Improving the stability of high expansion foam used for LNG vapor risk mitigation using exfoliated zirconium phosphate nanoplates // Process Safety and Environmental Protection. 2019. Vol. 123. Pp. 48–58. DOI: 10.1016/j.psep.2018.12.030
 21. Congliang Ye, Min Hua, Xuhai Pan, Baolong He, Juncheng Jiang. Development of heat transfer and evaporation model of LNG covered by Hi-Ex foam // Journal of Loss Prevention in the Process Industries. 2016. Vol. 44. Pp. 564–572. DOI: 10.1016/j.jlp.2016.09.014
 22. Suardin J.A., Yanjun Wang, Willson M., Mannan M.S. Field experiments on high expansion (HEX) foam application for controlling LNG pool fire // Journal of Hazardous Materials. 2009. Vol. 165. Pp. 612–622. DOI: 10.1016/j.jhazmat.2008.10.040
 23. Xiuxia Guo, Congliang Ye, Xinmiao Liang, Xuhai Pan, Min Hua, Godwin Suetor Cyril, Qian Yang. Analysis on the effects of high expansion foam on evaporation rate of the LNG // Safety Science. 2021. Vol. 137. P. 105183. DOI: 10.1016/j.ssci.2021.105183
 24. Bin Zhang, Yi Liu, Olewski T., Vechot L., Mannan M.S. Blanketing effect of expansion foam on liquefied natural gas (LNG) spillage pool // Journal of Hazardous Materials. 2014. Vol. 280. Pp. 380–388. DOI: 10.1016/j.jhazmat.2014.07.078

REFERENCES

1. Aleshkov M.V., Molchanov V.P., Batrikov D.L., Makarov S.A., Tretyakov A.V., Ioshchenko D.A. Prospects for scientific research of air-mechanical foam properties for containing and eliminating liquefied natural gas spills combustion. *Fires and Emergencies: prevention, Liquidation*. 2022; 1:12-20. DOI: 10.25257/FE.2022.1.12-20 (rus).
2. Molchanov V.P., Batrikov D.L., Molchanov M.V. Fire safety when using gas engine fuel. Analysis of the current state of the regulatory framework. *Ecovestnik*. 2019; 3. URL: <https://ekovestnik.ru/article/386654/> (rus).
3. Safonov V.S. *Problems of ensuring the safety of liquefied natural gas facilities. Part I. Regime and technological features of storage and shipment systems of liquefied natural gas*. Moscow, VNIIGAZ, 2021; 318. (rus).
4. Safonov V.S. *Problems of ensuring the safety of liquefied natural gas facilities. Part II. Modern approaches to modeling of emergency processes and their*

- consequences at the facilities of production, storage and transportation of liquefied natural gas. Moscow, VNIIGAZ, 2021; 442. (rus).
5. Rachevsky B.S. *Liquefied hydrocarbon gases*. Moscow, Oil and Gas Publ., 2009; 640. (rus).
 6. Bolodyan I.A., Molchanov V.P., Deshykh Yu.I., Shebeko Yu.N., Nekrasov V.P., Makeev V.I. et al. Fire and explosion safety of liquefied natural gas storage facilities. Evaporation and formation of fire and explosion hazardous clouds at liquid methane spillage. Methods for assessing parameters. *Pozharnaya bezopasnost'/Fire Safety*. 2000; 2:86-96. (rus).
 7. Chan S.T. Numerical simulation of LNG vapor dispersion from a fenced storage area. *Journal of Hazardous Materials*. 1992; 30(2):195-224. DOI: 10.1016/0304-3894(92)85078-F
 8. Brown T.C., Cederwall R., Chan S., Ermak D., Koopman R., Lamson K. et al. *Falcon series data report: 1987 LNG vapor barrier verification field trials*. Lawrence Livermore National Laboratory, 1990; 665. DOI: 10.2172/6633087
 9. Shebeko Yu.N., Filippov V.N., Navtsenya V.Yu., Kostyukhin A.K., Tokarev P.M., Zamyshevskiy E.D. Methods of fire protection of tanks with liquefied petroleum gases. *Pozharovzryvbezopasnost'/Fire and Explosion Safety*. 1999; 8(4):33-42. (rus).
 10. Kampervin J.P., Spruite M.P.N., Reynders J.E.A. *TNO 2016 R10352. Heat load resistance of cryogenic storage tanks. Results of LNG Safety Program*. Utrecht, TNO Publ., 2016; 70.
 11. Zang Qian-xi, Liang Dong. Thermal radiation and assessment of the impact of the fireball BLEVE LNG. *Procedia Engineering*. 2013; 52:602-606. DOI: 10.1016/j.proeng.2013.02.192
 12. Tagiev R.M. The first large-scale tests in the world practice on the passage of liquefied natural gas and its subsequent gorenje within the framework of scientific and technical cooperation of Gazprom gazobezopasnost LLC and GDF Suez S.A. *Safety objects of the fuel and energy complex*. 2013; 2:58-61. (rus).
 13. Korolchenko A.Ya., Korolchenko D.A. *Fire and explosion hazard of substances and materials and means of extinguishing them : handbook : in 2 Part. 2nd ed., reprint. and additional. Part I*. Moscow, Pozhnauka Publ., 2004; 713. (rus).
 14. Korolchenko A.Ya., Korolchenko D.A. *Fire and explosion hazard of substances and materials and means of extinguishing them : handbook : in 2 h. 2nd ed., reprint. Pozhnauka. Ch. II*. Moscow, Pozhnauka Publ., 2004; 774. (rus).
 15. Abduragimov I.M., Kuprin G.N. Unsolved problems of fire and explosion safety of energy resources (LPG and LNG) as the other side of the success of the energy strategy of the Russian Federation. *Pozharovzryvbezopasnost'/Fire and Explosion Safety*. 2014; 23(4):42-49. URL: <https://elibrary.ru/item.asp?id=21519968> (rus).
 16. Shebeko Yu.N., Navtsenya V.Yu., Kopylov S.N., Gorshkov V.I., Korolchenko I.A., Poletaev A.N. et al. Calculation of the main indicators of fire and explosion hazard of substances and materials : manual. Moscow, VNIPO, 2002; 77. (rus).
 17. Sharovarnikov A.F., Sharovarnikov S.A. Foaming agents and foams for extinguishing fires. Composition, properties, application. Moscow, Pozhnauka Publ., 2005; 335. (rus).
 18. Feshchenko A.N., Makarov S.A., Tretyakov A.V., Grigorievskaya I.I., Bituev R.B. Investigation of the insulating effect of fire-fighting foam on the surface of cryogenic liquid. *Problems of technosphere safety — 2022 : collection of works of XI Scientific and practical International Conference of Young Scientists and specialists*. Moscow, Academy of GPS of the Ministry of Emergency Situations of Russia, 2022; 232-238. URL: <https://elibrary.ru/item.asp?id=48545816> (rus).
 19. Yang Jie, Li Yuxin, Zhu Jianlu, Han Hui. Quantitative study of stability factors of liquid LNG foam: operating parameters and collection containers and time. *Process safety and environmental protection*. 2018; 117:223-231. DOI: 10.1016/j.psep.2018.05.005
 20. Krishnan P., Al-Rabbat A., Zhang B., Huang D., Zhang L., Mingxiang Zeng et al. Increasing the stability of high expansion foam used to reduce the risk of LNG vapor formation using exfoliating zirconium phosphate nanoplates. *Technological safety and environmental protection*. 2019; 123:48-58. DOI: 10.1016/j.psep.2018.12.030
 21. Congliang Ye, Ming Hua, Xiuhai Pan, Baolong He, Juncheng Jiang. Development of a model of heat transfer and evaporation of liquefied natural gas coated with Hi-Ex foam. *Journal of Loss Prevention in the processing industry*. 2016; 44:564-572. DOI: 10.1016/j.jlp.2016.09.014
 22. Suardin J.A., Yangjun Wang, Wilson M., Mannan M.S. Field experiments on the use of high expansion foam (HEX) for fire control in a pool for liquefied natural gas. *Journal of Hazardous Materials*. 2009; 165:612-622. DOI: 10.1016/j.jhazmat.2008.10.040
 23. Xiuxia Guo, Congliang Ye, Xinmiao Liang, Xiuhai Pan, Ming Hua, Godwin Suetor Cyril, Qian Yang. Analysis of the effect of foam with high expansion on the evaporation rate of LNG. *Science of Safety*. 2021; 137:105183. DOI: 10.1016/j.ssci.2021.105183
 24. Bin Zhang, Yi Liu, Olevski T., Vechot L., Mannan M.S. Protective effect of foaming foam on a tank for spilling liquefied natural gas (LNG). *Journal of Hazardous Materials*. 2014; 280:380-388. DOI: 10.1016/j.jhazmat.2014.07.078

Поступила 22.08.2022, после доработки 19.09.2022;
принята к публикации 28.09.2022

Received August 22, 2022; Received in revised form September 19, 2022;
Accepted September 28, 2022

Информация об авторах

АЛЕШКОВ Михаил Владимирович, д-р техн. наук, профессор, заместитель начальника по научной работе, Академия Государственной противопожарной службы Министерства Российской Федерации по делам гражданской обороны, чрезвычайным ситуациям и ликвидации последствий стихийных бедствий, Россия, 129366, г. Москва, ул. Бориса Галушкина, 4; РИНЦ ID: 257856; ORCID: 0000-0001-7844-1955; e-mail: aleshkov.m@mail.ru

МОЛЧАНОВ Виктор Павлович, д-р техн. наук, заместитель генерального директора по научной работе, Международный противопожарный центр, Россия, 117393, г. Москва, ул. Профсоюзная, 76; РИНЦ ID: 387381; ORCID: 0000-0002-8252-139X; e-mail: molvik.box@gmail.com

МАКАРОВ Сергей Александрович, канд. техн. наук, доцент кафедры общей и специальной химии, Академия Государственной противопожарной службы Министерства Российской Федерации по делам гражданской обороны, чрезвычайным ситуациям и ликвидации последствий стихийных бедствий, Россия, 129366, г. Москва, ул. Бориса Галушкина, 4; РИНЦ ID: 695632; ORCID: 0000-0002-0057-1247; e-mail: s17031975@rambler.ru

ИОЩЕНКО Дмитрий Александрович, заместитель начальника Учебно-научного комплекса пожарной и аварийноспасательной техники, начальник научно-исследовательского отдела, Академия Государственной противопожарной службы Министерства Российской Федерации по делам гражданской обороны, чрезвычайным ситуациям и ликвидации последствий стихийных бедствий, Россия, 129366, г. Москва, ул. Бориса Галушкина, 4; РИНЦ ID: 767944; ORCID: 0000-0003-3046-0238; e-mail: dmitriy.i@mail.ru

ТРЕТЬЯКОВ Алексей Владимирович, генеральный директор, ЭГИДА ПТВ, Россия, 127299, г. Москва, ул. Клары Цеткин, 18б, корп. 1, пом. 6; РИНЦ ID: 1049573; ORCID: 0000-0002-1988-5238; e-mail: atret@inbox.ru

БАРЕШКИН Владимир Вадимович, заместитель генерального директора по науке, ЭГИДА ПТВ, Россия, 127299, г. Москва, ул. Клары Цеткин, 18б, корп. 1, пом. 6; РИНЦ ID: 749350; ORCID: 0000-0001-5874-1635; e-mail: bareshkin@egida-ptv.ru

БИТУЕВ Рашид Борисович, адъюнкт факультета подготовки научно-педагогических кадров, Академия Государственной противопожарной службы Министерства Российской Федерации по делам гражданской обороны, чрезвычайным ситуациям и ликвидации последствий стихийных бедствий, Россия, 129366, г. Москва, ул. Бориса Галушкина, 4; РИНЦ ID: 1139160; ORCID: 0000-0001-9323-4348; e-mail: ibitya33@gmail.com

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

Information about the authors

Mikhail V. ALESHKOV, Dr. Sci. (Eng.), Professor, Deputy Head of Scientific Work, The State Fire Academy of the Ministry of Russian Federation for Civil Defense, Emergencies and Elimination on Consequences of Natural Disasters, Borisa Galushkina St., 4, Moscow, 129366, Russian Federation; ID RISC: 257856; ORCID: 0000-0001-7844-1955; e-mail: aleshkov.m@mail.ru

Viktor P. MOLCHANOV, Dr. Sci. (Eng.), Deputy General Director for Scientific Work, International Fire Prevention Center, Profsoyuznaya St., 76, Moscow, 117393, Russian Federation; ID RISC: 387381; ORCID: 0000-0002-8252-139X; e-mail: molvik.box@gmail.com

Sergey A. MAKAROV, Cand. Sci. (Eng.), Associate Professor of the Department of General and Special Chemistry, The State Fire Academy of the Ministry of Russian Federation for Civil Defense, Emergencies and Elimination on Consequences of Natural Disasters, Borisa Galushkina St., 4, Moscow, 129366, Russian Federation; ID RISC: 695632; ORCID: 0000-0002-0057-1247; e-mail: s17031975@rambler.ru

Dmitry A. IOSCHENKO, Deputy Head of the Educational and Scientific Complex of Fire and Rescue Equipment, Head of the Research Department, The State Fire Academy of the Ministry of Russian Federation for Civil Defense, Emergencies and Elimination on Consequences of Natural Disasters, Borisa Galushkina St., 4, Moscow, 129366, Russian Federation; ID RISC: 767944; ORCID: 0000-0003-3046-0238; e-mail: dmitriy.i@mail.ru

Alexey V. TRETYAKOV, General Director, EGIDA PTV, Klara Tsetkin St., 18b, bldg. 1, r. 6, Moscow, 127299, Russian Federation; ID RISC: 1049573; ORCID: 0000-0002-1988-5238; e-mail: atret@inbox.ru

Vladimir V. BARESHKIN, Deputy General Director for Science, EGIDA PTV, Klara Tsetkin St., 18b, bldg. 1, r. 6, Moscow, 127299, Russian Federation; ID RISC: 749350; ORCID: 0000-0001-5874-1635; e-mail: bareshkin@egida-ptv.ru

Rashid B. BITUEV, Postgraduate Student of the Faculty of Training of Scientific and Pedagogical Personnel, The State Fire Academy of the Ministry of Russian Federation for Civil Defense, Emergencies and Elimination on Consequences of Natural Disasters, Borisa Galushkina St., 4, Moscow, 129366, Russian Federation; ID RISC: 1139160; ORCID: 0000-0001-9323-4348; e-mail: ibitya33@gmail.com

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

ПОЖАРОВЗРЫВБЕЗОПАСНОСТЬ/FIRE AND EXPLOSION SAFETY. 2022. Т. 31. № 5. С. 83–86
POZHAROVZRYVOBEZOPASNOST/FIRE AND EXPLOSION SAFETY. 2022; 31(5):83-86

УДК 614.83

Системы защиты ячеек и батарейных блоков с литий-ионными аккумуляторами. Часть 2

Александр Сергеевич Харламенков ✉

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

АННОТАЦИЯ

Представлены требования нормативных документов по реализации безопасной эксплуатации литий-ионных аккумуляторов и аккумуляторных батарей. Проведено обобщение современных способов обеспечения защиты литий-ионных аккумуляторов. Рассмотрены внешние системы защиты ячеек и аккумуляторных блоков для предупреждения и устранения аварийных и пожароопасных режимов работы. Дано описание принципов работы защитных устройств и примеры их реализации на практике. Показаны примеры реализации внешних электронных систем защиты в виде отдельных печатных плат (*BMS*) и неэлектронных — в виде различных систем охлаждения (*BTMS*) и плавких предохранителей.

Ключевые слова: балансир; резистор; катушка индуктивности; конденсатор; электрический ток; напряжение; теплопроводность; температура; короткое замыкание

Для цитирования: Харламенков А.С. Системы защиты ячеек и батарейных блоков с литий-ионными аккумуляторами. Часть 2 // Пожаровзрывобезопасность/Fire and Explosion Safety. 2022. Т. 31. № 5. С. 83–86.

✉ Харламенков Александр Сергеевич, e-mail: h_a_s@live.ru

Systems for protecting cells and batteries with lithium-ion batteries. Part 2

Aleksandr S. Kharlamenkov ✉

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

ABSTRACT

The requirements of regulatory documents for the implementation of the safe operation of lithium-ion batteries and storage batteries are presented. A generalization of modern methods for ensuring the protection of lithium-ion batteries has been carried out. External systems for protecting cells and battery packs for the prevention and elimination of emergency and fire hazardous modes of operation are considered. A description of the principles of operation of protective devices and examples of their implementation in practice is given. Examples of the implementation of external electronic protection systems in the form of separate printed circuit boards (*BMS*) and non-electronic ones — in the form of various cooling systems (*BTMS*) and fuses are shown.

Keywords: balancer; resistor; inductor; capacitor; electric current; voltage; thermal conductivity; temperature; short circuit

For citation: 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. (rus).

✉ Aleksandr Sergeevich Kharlamenkov, e-mail: h_a_s@live.ru

ВОПРОС

В предыдущей рубрике «Вопрос – ответ» журнала № 4 за 2022 г. [1] были рассмотрены различные варианты систем защиты от аварийных режимов работы единичных элементов питания (ячеек) на примере цилиндрического литий-ионного аккумулятора марки 18650.

По результатам анализа и обобщения информации было отмечено, что в качестве внутренней системы защиты аккумуляторной ячейки могут выступать:

- основная система — устройства *PTC* (терморезистор) и *CID* (устройство прерывания тока с предохранительным клапаном). Устанавливаются со стороны положительной клеммы аккумулятора и достаточно эффективно справляются с задачей предотвращения саморазгона аккумулятора, его вздутия, взрыва;
- дополнительная система — электронная система защиты в виде платы *PCB* с или без предохранительного клапана. Размещается со стороны отрицательной клеммы аккумулятора и повышает безопасность его эксплуатации.

В случае применения аккумуляторных сборок (пакетов, блоков) требуются иные способы защиты, снижающие возникновение пожаровзрывоопасных случаев в процессе зарядки/разрядки. Такие системы защиты можно условно отнести к внешним, расположенным вне корпуса единичного элемента питания. Какие варианты внешних систем защиты применяют на сегодняшний день в аккумуляторных сборках?

ОТВЕТ

Следует отметить, что системы защиты, представленные в рубрике «Вопрос – ответ» журнала № 4 за 2022 г. [1], характерны для большинства различных моделей аккумуляторов. Практически у всех современных марок в качестве основной защиты применяются разрывные мембраны (см. рис. 1). Они не всегда снабжаются дополнительными устройствами в виде терморезисторов (*PTC*) и устройств прерывания тока (*CID*). Выполнение данных защитных функций в этих случаях возлагают на внешние электронные системы.

ГОСТ Р МЭК 62619–2020¹ требует обязательного наличия систем защиты, способных выполнять контроль предельных напряжений каждого отдельного аккумулятора или блока аккумуляторов. Эти системы могут дополняться дополнительными модулями.

Для реализации данного требования в аккумуляторных сборках, состоящих из 2-х и более элементов, используют внешние системы контроля батареи (*Battery Management System* или *BMS*). Эта система представляет собой печатную плату, подобную платам *PCB*, но с большим набором элементов и функционала. Плата *BMS* может осуществлять: контроль напряжения и температуры отдельных ячеек, световую индикацию их состояния; отключение цепи при глубоком разряде или перезаряде отдельного элемента; вывод или передачу данных о состоянии каждой ячейки на внешние устройства (подключаемый дисплей или посредством устройства *Bluetooth*). Состав и набор функционала зависит от цены, количества ячеек и конечных реализуемых задач.

Важным элементом системы контроля является балансир — встроенное в *BMS* плату или реализованное отдельно устройство, обеспечивающее равномерное распределение напряжения на всех аккумуляторных ячейках, ограничиваю-

щее чрезмерный заряд одних и разряд других элементов питания. Балансир позволяет обеспечить равномерный износ всех аккумуляторных ячеек и продлить общий срок службы батареи в целом при условии, что допустимое количество циклов балансировки не будет превышать определенного значения [2].

Балансиры разделяют на пассивные и активные. Пассивные балансиры (на стабилитронах) работают только в конечной фазе зарядки аккумуляторного блока, постепенно отключая отдельные ячейки, напряжение на которых достигло верхнего предела. Характеризуются малыми зарядными токами и значительным тепловыделением, которое не позволяет размещать балансирующую плату во внутреннем объеме аккумуляторного блока и требует дополнительной системы охлаждения, увеличивающей габаритные размеры всей системы. Для снижения тепловыделения применяют балансиры с шунтирующими резисторами, которые имеют меньшие размеры и могут устанавливаться непосредственно в основной корпус батареи (см. рис. 2).

Активные балансиры позволяют оперировать большими токами и обеспечивать равномерное перераспределение заряда от более к менее заряженным аккумуляторам не только во время заряда, но и в процессе разряда и хранения аккумуляторной сборки. Реализуются в виде отдельных плат с или без световой индикации.

Активные балансиры разделяются на индуктивные и емкостные (см. рис. 3). Индуктивный балансир использует катушки индуктивности (дроссели) в качестве промежуточных накопителей. Характеризуется потреблением меньших токов балансировки (1–1,5 А), чем у емкостных балансиров (5 А). Применяется для балансировки стандартных литий-ионных батарей (*Li-ion* и *Li-Pol*) и обычно имеет дополнительный блок управления «спящим режимом» для снижения потерь энергии в период, когда балансировка закончена.

Емкостные балансиры используют для выравнивания потенциалов ячеек конденсаторы и считают более универсальными, подходящими для работы с большинством типов аккумуляторов (преимущественно *LiFePO₄* и *LTO*).

Следует понимать, что наличие или отсутствие в системах защиты балансирующих схем не влияет на пожаровзрывобезопасность самих аккумуляторов. Как уже упоминалось выше, за безопасность ячеек и блоков в целом

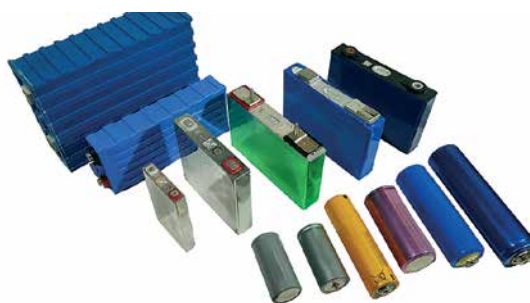


Рис. 1. Типы различных литиевых аккумуляторов с наличием предохранительных клапанов

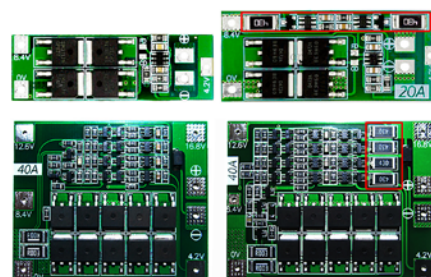


Рис. 2. Варианты изготовления плат *BMS* для реализации системы защиты литиевых аккумуляторов (красной рамкой обозначены платы с пассивными балансирами на резисторах)

¹ ГОСТ Р МЭК 62619–2020. Аккумуляторы и аккумуляторные батареи, содержащие щелочной или другие неокислотные электролиты. Требования безопасности для литиевых аккумуляторов и батарей для промышленных применений: введен в действие 01.08.2020. М. : Стандартинформ, 2020.

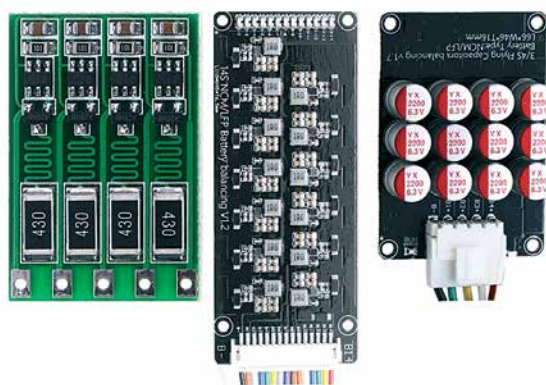


Рис. 3. Примеры выполнения балансиров на самостоятельных печатных платах (слева направо: резистивный, индуктивный, емкостный)

отвечают внутренние PCB- и внешние BMS-устройства. Функции последних частично выполняют и зарядные устройства (ЗУ), которые снабжены схемами управления зарядным током и напряжением, контроллерами температуры всего блока и каждой ячейки в отдельности, а также счетчиками ампер-часов, оценивающими заряженность батареи. Для безопасной и качественной зарядки литий-ионных аккумуляторов используют двухэтапную зарядку по схеме CC-CV (постоянная сила зарядного тока – постоянное напряжение). Для полной зарядки литий-ионного аккумулятора требуется сначала подавать постоянный зарядный ток с плавным повышением напряжения до верхнего предела, не допускающего перенапряжения, а далее при постоянном напряжении снизить зарядный ток до предела, не допускающего перезаряда аккумулятора (см. рис. 4).

Для качественного и безопасного заряда батарей большой емкости, получающих питание от генератора (в автомобилях, речном транспорте и др.), применяются так называемые DC-DC устройства – преобразователи постоянного напряжения генератора, которые обеспечивают контроль и изменение напряжений и токов по мере зарядки батареи аналогично схеме CC-CV.

Вышепредставленные варианты контроля состояния литий-ионных аккумуляторов относятся к внешней электронной системе защиты, размещаемой в корпусе блока с ячейками. При этом следует понимать, что сам корпус аккумуляторного блока также позволяет снизить риск возникновения пожаровзрывоопасной ситуации за счет его конструктивных особенностей.

Известно, что на нормальное состояние аккумуляторов негативно влияют различные вибрации и механические удары, а также отсутствие должного охлаждения отдельных ячеек. Для аккумуляторных сборок это особенно актуально, так как многие производители не предусматривают никаких внешних неэлектронных систем защиты ячеек. Небольшие батареи, состоящие из 4–10 ячеек, могут вполне обойтись без таких систем, но для большего числа следует предусматривать следующие варианты защиты.

В первую очередь для защиты сборок может применяться механическое разделение отдельных ячеек с помощью

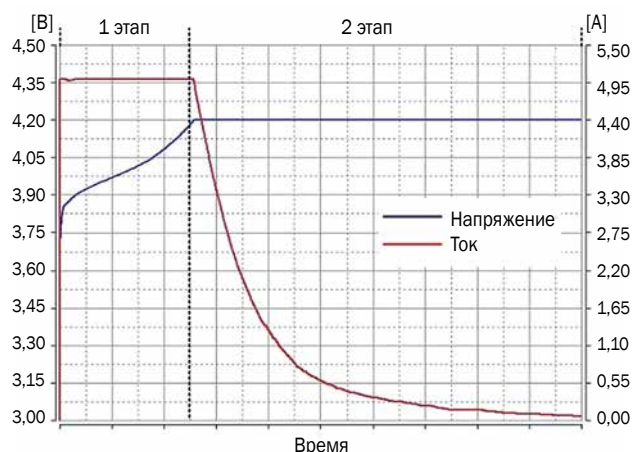


Рис. 4. Графики изменения напряжения и тока при двухэтапной зарядке литий-ионного аккумулятора

специальных посадочных гнезд (см. рис. 5, а). Они позволяют надежно зафиксировать каждую ячейку и обеспечить небольшие зазоры между соседними аккумуляторами, через которые более эффективно обеспечивается теплоотвод. Для устранения нежелательных вибраций и механических воздействий между ячейками размещаются прокладки из различных материалов, например листового стеклотекстолита (СТЭФ) толщиной 1 мм. Данный вариант обеспечивает надежную изоляцию соседних ячеек, что снижает вероятность распространения пожаровзрывоопасных воздействий между ними (см. рис. 5, б).

Кроме этого, существуют различные способы защиты аккумуляторных блоков от перегрева отдельных ячеек (*battery thermal management system – BTMS*): пассивное охлаждение с естественным теплоотводом через корпус; воздушное охлаждение с помощью вентиляторов; жидкостное охлаждение с помощью воды, гликолей и т.п.; системы терморегулирования за счет тепловых трубок или отдельных электронных устройств; гибридное охлаждение [3, 4].

Обоснование использования пассивных систем охлаждения во многом зависит от результатов анализа эффективности их применения с использованием методов экспериментального и компьютерного моделирования [5], которые позволяют получить оптимальные формы охлаждающих поверхностей с наличием или без дополнительных выступов (ребра). Для пассивных систем охлаждения разрабатываются новые способы теплоотвода за счет применения материалов PCM с изменяющимся фазовым состоянием (*Phase-Change Material*) [6]. Данные парафинсодержащие материалы при нагреве изменяют свое агрегатное состояние с твердого на жидкое, улучшая теплоотвод от корпуса аккумулятора. Имеют более низкую стоимость по сравнению с силиконовыми или графитовыми теплопроводящими пастами, высокую устойчивость к высыханию, а также не подвержены капиллярному и выдавливающему (*pump*) эффектам.

Наличие принудительной циркуляции воздуха через батарею с помощью вентиляторов увеличивает конечные габариты устройства, поэтому на практике, чаще всего прибегают к естественной конвекции воздуха между ячейками аккумуляторного блока или искусственной – при движении (в электросамокатах, электромобилях и т.п.).



Рис. 5. Варианты выполнения внешней неэлектронной защиты аккумуляторных блоков: *a* — объединение ячеек в аккумуляторный блок с помощью посадочных гнезд; *b* — отделение соседних ячеек друг от друга с помощью специальных прокладок

Новейшим и наиболее перспективным способом обеспечения эффективного теплообмена является применение прямого жидкостного охлаждения, называемого также иммерсионным [7]. В такой системе все ячейки аккумуляторного блока погружены в диэлектрическую жидкость (углеводородные и силиконовые масла, фторированные углеводороды и др.). Иммерсионное охлаждение обеспечивает лучшую однородность температуры каждой ячейки и всего блока по сравнению с другими методами охлаждения, что позволяет упростить конструкцию системы, обеспечить достаточную пожаровзрывобезопасность и снизить ее конечную стоимость.

В системах бесперебойного питания и электромобилях для защиты аккумуляторного блока или его части от короткого замыкания дополнительно применяются все известные плав-



Рис. 6. Примеры конструкции аккумуляторных блоков с установкой плавких предохранителей

кие предохранители, имеющие компактную форму и размеры для размещения на клеммах аккумуляторов (см. рис. 6). Представленные в статье технические решения позволяют обеспечить стабильность и долговечность работы литий-ионных аккумуляторов. В то же время используемые внутренние и внешние системы защиты, рассматриваемые в рамках реализации пожарной безопасности, можно считать частью системы предотвращения пожара. Эффективная и слаженная работа обеих систем значительно снижает риск возникновения пожара (взрыва) на объектах защиты, но не способна полностью устранить их пожаровзрывоопасность. Для этих целей требуется применение современных технических средств тушения и ограничения развития пожара, относящихся к системе противопожарной защиты, которые будут рассмотрены в следующем номере журнала.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Харламенков А.С. Системы защиты ячеек и батарейных блоков с литий-ионными аккумуляторами. Часть 1 // Пожаровзрывобезопасность/Fire and Explosion Safety. 2022. Т. 31. № 4. С. 76–79.
2. Сердечный Д.В., Томашевский Ю.Б. Управление процессом заряда многоэлементных литий-ионных аккумуляторных батарей // Измерение. Мониторинг. Управление. Контроль. 2017. Т. 21. № 3. С. 115–123. DOI: 10.21685/2307-5538-2017-3-16
3. Chen Y., Kang Y., Zhao Y., Wang L. et al. A review of lithium-ion battery safety concerns: The issues, strategies, and testing standards // Journal of Energy Chemistry. 2021. Vol. 59. Pp. 83–99. DOI: 10.1016/j.jechem.2020.10.017
4. Груздев А.И. Инновационные электрические накопители на базе литиевых источников тока для мобильных и стационарных применений // Инновации ГК Ростех. 2014. Т. 185. № 3. С. 112–120. URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=22768838>
5. Слабоспицкий Р.П., Хажмурадов М.А., Лукьянова В.П. Анализ перспективных систем охлаждения аккумуляторных батарей // Радиоэлектроника и информатика. 2013. Т. 61. № 2. С. 8–12. URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/analiz-perspektivnyh-sistem-ohlazhdeniya-akkumulyatornyh-batarey>
6. Patel J.R., Rathod M.K. Recent developments in the passive and hybrid thermal management techniques of lithium-ion batteries // Journal of Power Sources. 2020. Vol. 480. P. 228820. DOI: 10.1016/j.jpowsour.2020.228820
7. Roe C., Feng X., White G. et al. Immersion cooling for lithium-ion batteries — A review // Journal of Power Sources. 2022. Vol. 525. P. 231094. DOI: 10.1016/j.jpowsour.2022.231094

Материал поступил в редакцию 01.10.2022

Received October 1, 2022

Информация об авторе

ХАРЛАМЕНКОВ Александр Сергеевич, заместитель начальника кафедры специальной электротехники, автоматизированных систем и связи, Академия Государственной противопожарной службы Министерства Российской Федерации по делам гражданской обороны, чрезвычайным ситуациям и ликвидации последствий стихийных бедствий, Россия, 129366, г. Москва, ул. Бориса Галушкина, 4; ПИНЦ ID: 763967; e-mail: h_a_s@live.ru

Information about the author

Aleksandr S. KHARLAMENKOV, Deputy Head of Department of Special Electrical Engineering, Automation Systems and Communication, the State Fire Academy of the Ministry of Russian Federation for Civil Defense, Emergencies and Elimination on Consequences of Natural Disasters, Boris Galushkina St., 4, Moscow, 129366, Russian Federation; ID RISC: 763967; e-mail: h_a_s@live.ru

ПРАВИЛА ДЛЯ АВТОРОВ!

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

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

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

Редакция просит авторов при подготовке рукописи руководствоваться изложенными ниже правилами.

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

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

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

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

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

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

Материал статьи должен излагаться в следующем порядке.

2.1. Номер УДК (универсальная десятичная классификация).

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

2.3. Информация об авторах.

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

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

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

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

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

2.3.3. ORCID, Researcher ID, Scopus Author ID.

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

В описании источников необходимо указывать всех авторов.

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

При составлении References необходимо следовать схеме:

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

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

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

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

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

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

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