5-2024

FIRE SAFETY ПОЖАРОВЗРЫВОБЕЗОПАСНОСТЬ

НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКИЙ ЖУРНАЛ

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

КОМПЛЕКСНАЯ БЕЗОПАСНОСТЬ

пожарная • промышленная • производственная • экологическая

ВЛИЯНИЕ ПАРАМЕТРОВ СЕЧЕНИЯ ЧУГУННЫХ ТЮБИНГОВ ОБДЕЛКИ ТОННЕЛЕЙ МЕТРО НА ИХ ОГНЕСТОЙКОСТЬ

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

ПОЖАРОВЗРЫВОБЕЗОПАСНОСТЬ

НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКИЙ ЖУРНАЛ

ТОМ 33
№5 2024

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 Ю.З.**

Адрес редакции:
129337, г. Москва, Ярославское ш., д. 26

Адрес для переписки:
129337, г. Москва, Ярославское ш., д. 26, корп. 8

E-mail: info@fire-smi.ru
https://www.fire-smi.ru

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

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

Подписано в печать 28.10.2024.
Выход в свет 31.10.2024.
Формат 60 × 84 1/8. Тираж 2000 экз.
Бумага мелованная матовая.
Печать офсетная. Цена свободная.
Распространяется по подписке.

Отпечатано в типографии
Издательства МИСИ – МГСУ
129337, Москва, Ярославское ш., д. 26, корп. 8.

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

ГЛАВНЫЙ РЕДАКТОР:

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

ЗАМ. ГЛАВНОГО РЕДАКТОРА:

Мольков В.В., д. т. н., профессор (Ольстерский университет, Ньютаунабби, Великобритания)

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 университет, Уфа, Россия, Республика Башкортостан)

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

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

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

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

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

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

Ложкин В.Н., д. т. н., профессор (Санкт-Петербургский университет Государственной 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 деятель науки РФ (Академия Государственной противопожарной службы МЧС России, Москва, Россия)

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

Рестас А. (Институт управления при ЧС Национального университета Государственной службы, Будапешт, Венгрия)

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

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

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

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

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

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

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

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

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

СОДЕРЖАНИЕ

CONTENTS

ПРОЦЕССЫ ГОРЕНИЯ, ДЕТОНАЦИИ И ВЗРЫВА

COMBUSTION, DETONATION AND EXPLOSION PROCESSES

В.А. ГОРЕВ, М.М. РУКАВИШНИКОВ,
Одномерная гидравлическая модель горения в преградах — 5

V.A. GOREV, M.M. RUKAVISHNIKOV
One-dimensional hydraulic model of combustion in obstacles

СТАТИСТИКА И СИСТЕМНЫЙ АНАЛИЗ

STATISTICS AND SYSTEM ANALYSIS

С.В. ПУЗАЧ, С.А. ЛУЧКИН, А.В. ГОМОЗОВ
Анализ теплового воздействия на окна лестничной клетки пожара, возникшего на балконе жилого здания — 16

S.V. PUZACH, S.A. LUCHKIN, A.V. GOMOZOV
Analysis of the thermal impact on the stairwell windows of a fire that occurred on the balcony of a residential building

БЕЗОПАСНОСТЬ ЗДАНИЙ, СООРУЖЕНИЙ, ОБЪЕКТОВ

SAFETY OF BUILDINGS, STRUCTURES, OBJECTS

Е.С. РАССКАЗОВ, Д.А. КОРОЛЬЧЕНКО
Применение легкосбрасываемых сэндвич-панелей для защиты производственных зданий в условиях арктического климата — 26

E.S. RASSKAZOV, D.A. KOROLCHENKO
Application of lightweight removable sandwich panels for protection of industrial buildings in Arctic climate conditions

А.А. КОМАРОВ, Н.В. ГРОМОВ, А.Д. КОРОЛЬЧЕНКО, П.С. ЛАНСКОЙ
Общие принципы защиты объектов от беспилотных летательных аппаратов — 51

A.A. KOMAROV, N.V. GROMOV, A.D. KOROLCHENKO, P.S. LANSKOY
Protection of objects from unmanned aerial vehicles

СРЕДСТВА И СПОСОБЫ ТУШЕНИЯ ПОЖАРОВ

MEANS AND WAYS OF FIRE EXTINGUISHING

О.Н. КОРОЛЬЧЕНКО, Д.В. ПОЛЯКОВ, С.А. КОВАЛЕВА
Определение огнетушащей способности автономных термоактивируемых устройств газового пожаротушения — 61

O.N. KOROLCHENKO, D.V. POLYAKOV, S.A. KOVALEVA
Determination of fire extinguishing ability of autonomous thermoactivated gas fire extinguishing devices

ЭКОНОМИКА И УПРАВЛЕНИЕ ПОЖАРНОЙ И КОМПЛЕКСНОЙ БЕЗОПАСНОСТЬЮ

ECONOMICS AND FIRE AND COMPLEX SAFETY CONTROLE

Д.А. КОРОЛЬЧЕНКО, Ф.А. ПОРТНОВ
Влияние параметров сечения чугунных тюбингов обделки тоннелей метро на их огнестойкость — 72

D.A. KOROLCHENKO, F.A. PORTNOV
Influence of cross-section parameters of cast-iron tubbings of metro tunnel lining on their fire resistance

И.В. САМАРИН, А.Ю. СТРОГОНОВ, А.В. КРЮЧКОВ
Модель прогнозирования класса готовности датчиков термохимического газосигнализатора для предотвращения пожаров и взрывов — 87

I.V. SAMARIN, A.Yu. STROGONOV, A.V. KRYUCHKOV
Model of predicting the readiness class of thermochemical gas alarm sensors for fire and explosion prevention

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.

© ФГБОУ ВО «НИУ МГСУ», 2024

© Federal State Budget Educational Institution of Higher Education "Moscow State University of Civil Engineering (National Research University)", 2024

КОМПЛЕКСНАЯ БЕЗОПАСНОСТЬ

пожарная • промышленная • производственная • экологическая

Воздействие пожара на балконе на окна лестничной клетки

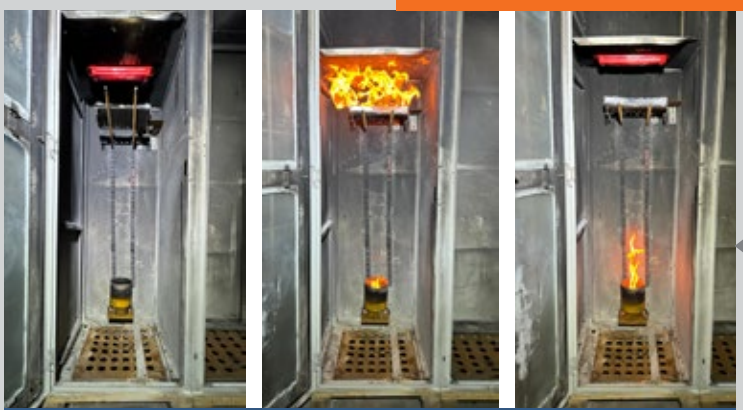
Стр. 16

Легкосбрасываемые сэндвич-панели в условиях Арктики

Стр. 26

Общие принципы защиты объектов от БПЛА

Стр. 51



Автономные термоактивируемые устройства пожаротушения

Стр. 61

Сечение чугунных тюбингов тоннелей метро и их огнестойкость

Стр. 72

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

SCIENTIFIC AND TECHNICAL JOURNAL

FIRE AND EXPLOSION SAFETY

POZHAROVZRYVOBEZOPASNOST

No.5 VOL. 33 2024

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 Y.Z.**

Address of Editorial Staff:
26 Yaroslavskoe shosse, Moscow, 129337, Russia

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

E-mail: info@fire-smi.ru
https://www.fire-smi.ru

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

No part of this publication may be used or reproduced in any form or by any means without the prior permission of the Publishers. Reproducing any part of this material a reference to the journal is obligatory.
Authors and advertisers account for contents of given papers and for publishing in the open press.
Opinion of Editorial Staff not always coincides with Author's opinion.

Signed for printing 28.10.2024.
Date of publication 31.10.2024.
Format is 60 × 84 1/ 8.
Printing is 2000 copies.
Chalk-overlay mat paper.
Offset printing. Free price.
Journal sells subscription.

Printing house of the Publishing house MISI – MGSU
building 8, 26 Yaroslavskoe shosse, Moscow, Russian Federation, 129337.

EDITOR-IN-CHIEF:

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

DEPUTY EDITOR-IN-CHIEF:

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

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

EDITORIAL BOARD:

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

Yu.N. Shebeko, Dr. Sci. (Eng.), Professor, Full Member of National Academy of Fire Science (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)

ПОЖАРОВЗРЫВОБЕЗОПАСНОСТЬ/FIRE AND EXPLOSION SAFETY. 2024. Т. 33. № 5. С. 5–15
POZHAROVZRYVOBEZOPASNOST/FIRE AND EXPLOSION SAFETY. 2024; 33(5):5-15

НАУЧНАЯ СТАТЬЯ/RESEARCH PAPER

УДК 614.841.12

https://doi.org/10.22227/0869-7493.2024.33.05.5-15

Одномерная гидравлическая модель горения в преградах

Вячеслав Александрович Горев[1], Максим Михайлович Рукавишников[2] ✉

[1] Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет, г. Москва, Россия

[2] 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. Вопрос влияния конфигурации загроможденного пространства на динамику развития аварийного взрыва, в частности на интенсивность ускорения пламени, исследуется достаточно давно. Во многих работах экспериментальными и численными методами рассматривается горение в преградах при их различном количестве, взаимном расположении, геометрических формах и других параметрах. Тем не менее в большинстве случаев рассматриваются преграды, расположенные упорядоченно, периодически. При этом взрывы газовых облаков могут происходить в условиях, где преграды, представленные строительными конструкциями и технологическим оборудованием, расположены неорганизованно.
Цель. Смоделировать процесс горения в массиве расположенных произвольно преград с учетом конкретных параметров загроможденного пространства (количества преград n_x, их среднего размера d, блокирующего отношения BO и объемной загроможденности θ) с помощью разрабатываемой гидравлической модели развития взрыва.
Метод исследования. Решается задача о горении в закрытой с одного конца трубе заданных геометрических параметров. Приведены выражения для расчета параметров загроможденного пространства, а также принцип, в соответствии с которым данные параметры интегрированы в гидравлическую модель.
Описание физической модели. Представлена система основных дифференциальных и алгебраических уравнений разрабатываемой модели.
Результаты и их обсуждение. Получены зависимости видимой скорости пламени $(X_f)'$ от величины пройденного пламенем пути X_f. Расчет проводился для преград с размером d = 1–4 см при разных θ (0,1–0,25) и BO (0,09–0,37), величины которых регулировались изменением n_x.
Выводы. С ростом d или n_x пламя в загроможденном преградами пространстве ускоряется сильнее. Рост BO, как и θ, ведет к увеличению скорости потока газа перед фронтом пламени и эффективной скорости горения. А следовательно, и к более интенсивному ускорению пламени. Полученные результаты позволяют проводить верификацию модели с помощью экспериментальных данных и улучшать ее в дальнейшем.

Ключевые слова: развитие взрыва; загроможденное пространство; дефлаграционное горение; ускорение пламени; аварийные взрывы

Для цитирования: *Горев В.А., Рукавишников М.М.* Одномерная гидравлическая модель горения в преградах // Пожаровзрывобезопасность/Fire and Explosion Safety. 2024. Т. 33. № 5. С. 5–15. DOI: 10.22227/0869-7493.2024.33.05.5-15

✉ *Рукавишников Максим Михайлович*, e-mail.rukavishnikov3.5.1@yandex.ru

One-dimensional hydraulic model of combustion in obstacles

Vyacheslav A. Gorev[1], Maxim M. Rukavishnikov[2] ✉

[1] National Research Moscow State University of Civil Engineering, Moscow, Russian Federation

[2] 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 question of the influence of the configuration of the obstacled space on the dynamics of the emergency explosion development, in particular on the intensity of flame acceleration, has been studied for quite a long time. In many works by experimental and numerical methods combustion in obstacles at their various quantity, mutual location, geometrical forms and other parameters is considered. Nevertheless, in most cases, obstacles arranged in organized and periodical manner are considered. At the same time, explosions of gas clouds can occur in conditions where obstacles represented by building structures and technological equipment are arranged in an unorganized manner.

© В.А. Горев, М.М. Рукавишников, 2024

Objective. To simulate the combustion process with an array of randomly placed obstacles, taking into account the specific parameters of the confined space (the number of obstacles n_x, their average size d, blocking ratio BO and volumetric clutter θ) using the developed hydraulic model of explosion development.
Research method. The problem of combustion in a pipe closed at one end with specified geometric parameters is solved. Expressions for calculating the parameters of a confined space are given, as well as the principle according to which these parameters are integrated into a hydraulic model.
Description of the physical model. The system of basic differential and algebraic equations of the developed model is presented.
Results and discussion. Functions of the flame speed $(X_f)'$ to the path traversed by flame X_f are obtained. The calculation was carried out for obstacles with a size d = 1–4 cm at different θ (0.1–0.25) and BO (0.09–0.37), which were adjusted by changing n_x.
Conclusion. With the growth of d or n_x, the flame in the obstacled space accelerates more strongly. The growth of BO, like θ, leads to an increasing of the gas flow rate in front of the flame and the effective combustion rate. And, consequently, to more intense flame acceleration. Obtained results are make it possible to verify the model using experimental data and improve it in the future.

Keywords: explosion development; obstacled space; deflagration; flame acceleration; industrial explosions

For citation: Gorev V.A., Rukavishnikov M.M. One-dimensional hydraulic model of combustion in obstacles. *Pozharovzryvobezopasnost/Fire and Explosion Safety*. 2024; 33(5):5-15. DOI: 10.22227/0869-7493.2024.33.05.5-15 (rus).

✉ *Maxim Mikhaylovich Rukavishnikov,* e-mail.rukavishnikov3.5.1@yandex.ru

Введение

Аварийные взрывы газов, как правило, происходят в режиме дефлаграционного сгорания. Об этом свидетельствуют многочисленные обзоры реальных взрывов [1–3]. Только взрыв в Порт-Хадсоне (США) иногда обозначают как «квазидетонацию», что на самом деле говорит о реализации быстрой дефлаграции.

Взрывы в открытом пространстве носят волновой характер. И для того, чтобы давление во фронте волны превысило значение в 10 кПа, скорость горения должна возрасти в десятки, иногда в сотни раз по отношению к скорости ламинарного горения большинства углеводородов, равной примерно 0,4 м/с. Такая интенсификация горения может произойти только в турбулентной среде с развитой площадью горения. Похожие условия создаются при взрывах в пространствах, загроможденных различными преградами (наружные технологические установки, коммуникации, строения и другое).

Поток горючей смеси впереди фронта пламени, возникающий под воздействием расширяющихся продуктов горения, взаимодействует с преградами, в результате чего происходит турбулизация среды и увеличение площади горения за счет огибания преград. Такой механизм ускорения горения обсуждался, например, в работах [4, 5].

В частности, в [4] описан порядок, согласно которому в начале процесса скорость газа невелика и уровень турбулентности низкий. Эффективная скорость горения растет в этом случае за счет увеличения площади горения в процессе огибания преград, т.е. действует механизм сдвига скоростей глобального течения. Возмущения в зоне горения при этом длинноволновые. По мере увеличения скорости горения, а следовательно, и скорости потока уровень турбулентности возрастает, и главную роль в увеличении скорости горения начинают играть возмущения, вызванные этой турбулентностью.

Подавляющее большинство экспериментальных работ, направленных на изучение процесса горения в загроможденных пространствах, сосредоточены на структурах с периодически повторяющимися преградами. Например, прохождение пламени через преграды в виде расположенных периодически перегородок было экспериментально рассмотрено в работах [6, 7]. Основной результат этих исследований заключается в интенсификации горения с увеличением блокирующего отношения, основной характеристики, определяющей ускорение горения, а также с уменьшением расстояния между преградами, т.е. с ростом частоты их расположения. Подобные исследования остаются актуальными и проводятся по сей день [8–11].

Интенсивно развивались и численные методы исследования данного процесса. В частности, в работе [12] систематически изучалось горение в лабораторной установке методом LES (Large Eddy Simulation), в которой преграды располагались также периодически. Результаты вычислений в основном соответствовали экспериментальным данным. В работе [13] численно было получено, что при увеличении количества преград на единицу длины загроможденного канала увеличивается количество возмущений во фронте пламени и, как следствие, площадь горения и скорость пламени возрастают. Похожий эффект можно наблюдать при уменьшении расстояния между преградами [14, 15].

При этом в ряде работ [16, 17] обнаружены условия, когда увеличение блокирующего отношения уменьшает его ускоряющее действие, а увеличение количества преград не влияет на скорость распространения пламени. Дальнейшие исследования показали, что существуют некоторые условия, в том числе соот-

ношение количества преград и их взаимного расположения, которым соответствует максимальное ускорение [18–20]. Причем эти условия могут различаться в зависимости от характеристик исходной смеси [21].

Влияние формы преград на ускорение пламени при взрыве было исследовано, например, в работах [22–25]. В частности, в [22, 23] экспериментально получен вывод о том, что наличие на пути распространения пламени препятствий с острыми вершинами сильнее интенсифицирует турбулизацию среды за ними, усиливая тем самым ускорение пламени. Похожие выводы были получены численно в [24].

Помимо преград с простой геометрической формой, в исследованиях применительно к сферическому пламени были использованы также кубические [25] и сферические сетки [17], а также преграды, имитирующие реальные объекты [26]. В частности, в [25] было получено, что эффект ускорения пламени наблюдается до тех пор, пока на пути распространения пламени будут присутствовать преграды, причем чем меньше их объемная проницаемость в пространстве (размер сеточной ячейки), тем сильнее пламя будет ускоряться.

Обратная ситуация была рассмотрена в работе [27], в которой применялись мелкоячеистые сетки квадратного сечения. При использовании такой сетки в несколько слоев проницаемость преград сильно снижается. Набегающий на сетку поток делится на множество мелкомасштабных вихрей, температура которых слишком мала для поддержания процесса горения. В результате наблюдается гашение пламени.

Отметим, что при горении в трубах при определенных условиях может наблюдаться переход в детонацию. Возможность и причины реализации такого режима горения также активно исследуются на сегодняшний день [13, 24, 28–30].

В данной работе разрабатывается одномерная гидравлическая модель развития горения в массиве преград. При этом предполагается рассматривать преграды, расположенные не только периодически, но и произвольно. Выбор такого подхода обоснован тем, что для гидравлической модели накоплен фактический материал для учета действия различных преград, в том числе и массива преград[1].

Метод исследования

Рассматривается процесс горения в закрытой с одного конца трубе квадратного сечения $D \times D$ и длиной L. Инициирование горения происходит у закрытого конца. Начальная форма пламени полусферическая. Фронт горения относительно горючей смеси движется с заданной скоростью S_L. Обычно это фундаментальная ламинарная скорость невозмущенного пламени. После касания пламенем стенок трубы вводится экспериментальный множитель K_f, учитывающий увеличение площади горения по сравнению с площадью поперечного сечения канала. В отсутствие преград эффективная скорость горения $U_{eff} = K_f S_L$. В дальнейшем предполагается, что пламя плоское с площадью D_2. Взаимодействие потока со стенками трубы при этом не учитывается, поскольку данная работа ориентирована, в том числе, на изучение взрыва в открытом пространстве. Турбулизация потока в трубе происходит вследствие наличия на пути распространяющегося пламени произвольно расположенных чередующихся преград. В результате с течением времени масса продуктов горения будет изменяться следующим образом:

$$\frac{dM}{dt} = U_{eff} \rho D^2. \quad (1)$$

Предполагается, что плотность и давление газа связаны соотношением адиабаты:

$$\frac{P_i}{\rho_i^{\gamma_i}} = \frac{P_0}{\rho_0^{\gamma}}. \quad (2)$$

В рассматриваемой модели генерирование турбулентности происходит за счет взаимодействия движущегося перед зоной горения потока и преград, расположенных на его пути. При этом локальные характеристики турбулентности определяются локальным значением скорости этого потока V и локальными характеристиками пространства с преградами.

Пусть на заданном участке трубы поперечно направлению движения потока произвольно расположены цилиндрические преграды со средним диаметром d в количестве n_x. Длину загроможденного преградами участка (далее — контрольный объем) обозначим величиной ΔX, а его объем будет равен $D^2 \cdot \Delta X$.

В данном случае пространство, занятое преградами, помимо среднего размера преград d, характеризуется:

- их объемной долей в контрольном объеме или загроможденностью:

$$\theta = \frac{\sum_{i=1}^{n_x} n_i \frac{\pi}{4} d_i^2 D}{D^2 \Delta X}; \quad (3)$$

- средним расстоянием между преградами:

$$h = \left[\frac{D^2 \Delta X}{n_x} \right]^{\frac{1}{3}}; \quad (4)$$

[1] *Sha W.T., Launder B.E.* A model for turbulent momentum and heat transport in large rod bundles // Argonne National Labs. 1979. URL: https://digital.library.unt.edu/ark:/67531/metadc283250

- площадью поверхности преград в единице контрольного объема:

$$A_w = \frac{\sum_{i=1}^{n_x} n_i \pi d_i D}{D^2 \Delta X}; \quad (5)$$

- средним блокирующим отношением:

$$BO = \frac{d}{h}. \quad (6)$$

В теории турбулентного горения существуют различные выражения для скорости турбулентного горения U_T. Наиболее часто для развитой турбулентности и не подверженного сильному влиянию стретч-эффекта пламени используется зависимость $U_T = C_1 U'$, где коэффициент $C_1 = 2$ для больших масштабов турбулентности, а U' — пульсационная составляющая, которая в широком диапазоне значений BO ($0 \le BO \le 0{,}4$), основываясь на [31], характеризуется следующей зависимостью:

$$U' \approx \frac{BO}{2} V. \quad (7)$$

При этом, если $C_1 = 1$ [32], то $U_T = U'$. Тогда:

$$U_T = \frac{BO}{2} V. \quad (8)$$

Отметим, что возможны и другие определения BO, что уточняется при анализе экспериментальных результатов.

Эффективная скорость горения в турбулентной зоне определяется площадью пламени A_f, а также суммой ламинарной и турбулентной скоростей, и с учетом выражения (8) записывается следующим образом:

$$U_{eff} = A_f \left(S_L + \frac{BO}{2} V \right). \quad (9)$$

Описание физической модели

Из уравнения состояния идеального газа для продуктов сгорания выводится уравнение для описания изменения их давления по времени. Продукты горения предполагаются неподвижными вследствие граничных условий на закрытом конце трубы. Кроме того скорость движения зоны горения относительно продуктов горения меньше скорости звука в них, т.е. дефлаграция Чэпмена–Жуге не достигается. При переходе через зону горения давление в продуктах сгорания связывается с давлением несгоревшего газа впереди фронта пламени с помощью соотношения Рэлея – Михельсона. Скорость движения пламени выражается как $X_f' = U_{eff} + V_1$, где скорость газа перед фронтом горения V_1 связывается с давлением перед фронтом пламени выражением для простой волны с учетом сопротивления потоку на преградах.

В результате получается замкнутая система, которая позволяет определить все характеристики взрывного процесса через скорость горения. Данная система представлена в безразмерном виде:

$$\frac{d\overline{\Delta P_2}}{d\bar{t}} = \frac{\gamma_2 (1 + \overline{\Delta P_2})}{\overline{X_f}(1-\theta)} \cdot \left[\overline{A_f} \left(1 + \frac{\frac{BO}{2}\overline{V}_1}{1 + 0{,}06\frac{BO}{2}\overline{V}_1(\bar{t} - \bar{t}_k)\overline{A_w}} \right) \sigma - (1-\theta)\frac{d\overline{X_f}}{d\bar{t}} + \overline{X_f}\frac{d\overline{X_f}}{d\bar{t}}\frac{d\theta}{d\overline{X_f}} \right]; \quad (10)$$

$$\frac{d\overline{X_f}}{d\bar{t}} = \overline{U}_{eff} + \overline{V}_1; \quad (11)$$

$$\overline{\Delta P_1} = \overline{\Delta P_2} + (\sigma - 1)(1 + \overline{\Delta P_1})^{\frac{1}{\gamma_1}} \overline{U}_{eff}^{\,2} \overline{S_L}^{\,2}; \quad (12)$$

$$1 + \overline{\Delta P_1} = \left(1 + \frac{\gamma_1 - 1}{2} \frac{\overline{V_1}\,\overline{S_L}}{\overline{\gamma_1}^{\frac{1}{2}}} \right)^{\frac{2\gamma_1}{\gamma_1 - 1}} + \overline{\Lambda}(1 + \overline{\Delta P_1})^{\frac{1}{\gamma_1}} \frac{\overline{V_1}^{\,2}}{2} \overline{S_L}^{\,2} \left[\frac{\overline{X_k} - \overline{X_f}}{2} \right]. \quad (13)$$

Турбулентная скорость горения в данной модели выражается через дробь, где числитель принимается аналогичным выражению (8), а знаменатель качественно описывает диссипацию турбулентной энергии ε за преградами, исходя из $\varepsilon = 0{,}36U'^3/L$, где масштаб турбулентности $L = C_l/A_w$ ($C_l = 0{,}1 - 0{,}4$)[1].

Степень расширения продуктов горения здесь зависит от плотности свежей смеси и продуктов: $\sigma = (\rho_1/\rho_2)$.

Переменная Λ в выражении (13) описывает характер сопротивления распространяющемуся в трубе потоку, вызванному возникновением сил трения при его взаимодействии с преградами, и в безразмерном виде определяется как:

$$\overline{\Lambda} = f\overline{A}_w. \quad (14)$$

Здесь параметр f представляет собой функцию, вид которой зависит от геометрических параметров преград и от геометрии свободного пространства между ними. В случае, рассматриваемом в данной задаче, поток распространяется поперечно цилиндрическим стержням, поэтому в соответствии с [31] параметр f может быть определен следующим образом:

$$f = \left\{0{,}23 + \frac{0{,}11}{\left[\left(3\frac{h}{d}\right)^{0{,}5} - 1\right]^{1{,}08}}\right\} \mathrm{Re}^{-0{,}15}, \qquad (15)$$

где $\mathrm{Re} = V_1 d/\nu$ — число Рейнольдса, которое зависит от скорости потока, среднего диаметра стержней, а также от коэффициента вязкости ν, значение которого принято равным $1{,}6 \cdot 10^{-5}$ м^2/сек.

Здесь и далее в работе используются следующие обозначения величин: t — время, с; t_k — время выхода пламени из загроможденного преградами контрольного объема, с; ΔP_1 — изменение давления свежей смеси, Па; ΔP_2 — изменение давления продуктов сгорания, Па; γ_1 — показатель адиабаты свежей смеси; γ_2 — показатель адиабаты продуктов сгорания; σ — физическая степень расширения продуктов сгорания; ρ_1 — плотность свежей смеси, кг/м^3; ρ_2 — плотность продуктов сгорания, кг/м^3; X_f — положение фронта пламени относительно начала координатной оси (закрытого конца трубы), м; X_k — положение фронта пламени при $t = t_k$ (в момент времени выхода пламени из контрольного объема), м; θ — объемная загроможденность контрольного объема преградами, %, доли; BO — блокирующее отношение, %, доли; A_f — площадь поверхности фронта пламени, м^2; A_w — общая площадь преград на единицу контрольного объема, м^2/м^3; U_{eff} — эффективная скорость горения, м/с; V_1 — скорость движения свежей смеси, м/с; S_L — ламинарная скорость пламени, м/с; $n_{i(x)}$ — порядковый номер преграды (количество преград); d — средний диаметр преграды, м; h — среднее расстояние между преградами, м; ΔX — длина загроможденного преградами участка трубы, м; D — высота/ширина трубы, м; L — длина трубы, м.

Параметры с размерностью,м, были обезразмерены на характерный размер D:

$$\overline{X}_f = \frac{X_f}{D};\ \overline{A_w} = A_w D;\ \bar{t} = \frac{tS_L}{D};\ \overline{V_1} = \frac{V_1}{S_L};$$

$$\overline{\Delta P} = \frac{\Delta P}{P_0};\ \bar{\rho} = \frac{\rho}{\rho_0};\ \overline{S_L} = \frac{S_L}{\left(\frac{P_0}{\rho_0}\right)^{\frac{1}{2}}}.$$

Исходные данные для проведения расчета
The initial data for the calculation

Показатель Indicator	Значение Value
Показатель адиабаты исходной смеси γ_1 Heat capacity ratio of unburned gas γ_1	1,4
Показатель адиабаты исходной смеси γ_2 Heat capacity ratio of combustion products γ_2	1,27
Начальная степень расширения продуктов горения σ Combustion product's degree of expansion σ	7
Безразмерная ламинарная скорость пламени $\overline{S_L}$ Dimensionless laminar burning velocity $\overline{S_L}$	$1{,}37 \cdot 10^{-3}$
Безразмерная максимальная площадь пламени (задается через экспериментальный множитель K_f) Dimensimaximum flame area (set using an experimental multiplier K_f)	1,2
Количество преград в контрольном объеме n_x The number of obstacles in a confined volume n_x	Var
Средний диаметр преград d Average obstacles diameter d	1–4 см 1–4 cm
Длина трубы L Pipe length L	2 м 2 m

Исходные данные для проведения моделирования

Ниже представлены исходные данные (см. табл.), которые были использованы при решении уравнений физической модели, описанной выше.

При моделировании было принято, что участок с преградами начинается сразу после места, где происходит соприкосновение пламени с боковыми стенками трубы, а площадь пламени выходит на свое максимальное значение, т.е. завершается сферический режим горения. Размерная длина участка с преградами ΔX принимается равной 120 см. Характерный размер трубы D принимается 20 см. Начальная размерная координата X_f, при которой пламя входит в контрольный объем, загроможденный преградами, принимается равной 5,2 см.

Величины θ, h и BO определяются в зависимости от n_x и d в соответствии с выражениями (3), (4), (6).

Начальные условия для определяемых параметров взрыва принимались нулевыми.

Результаты моделирования и их обсуждение

На рис. 1–7 ниже представлены безразмерные зависимости скорости пламени от его положения относительно начала трубы (источника зажигания).

Отмечены соответствующие значения блокирующего отношения, объемной загроможденности, среднего диаметра преград. Точка «А» на рис. 1 соответствует окончанию полусферического режима горения, точка «В» – началу горения в контрольном объеме с преградами, «С» – выходу пламени из контрольного объема. Расположение указанных точек соответствует рис. 2–7.

Для преград со средним диаметром d = 1 см их количество в контрольном объеме было подобрано таким образом, чтобы загроможденность θ была равна 0,01; 0,05; 0,1; 0,15 и 0,2. Тот же принцип использовался при исследовании преград с другими размерами (рис. 2–4).

В начальный момент времени (до точки «А») форма фронта горения предполагается полусферической. Видимая скорость пламени, соответствующая эффективной скорости горения, зависит от развития фронта горения и выходит на установившееся значение (плато) примерно в один момент времени ($\overline{X_f}$ = 0,2), где пламя достигает стенок трубы, а его площадь выходит на свою максимальную величину.

Далее, по достижении зоны, загроможденной преградами (точка «В», $\overline{X_f}$ = 0,26), вводится механизм турбулизации потока. Пламя, обтекая преграды, ускоряется, а рост эффективной скорости горения U_{eff} определяется выражением (9). При этом с ростом загроможденности θ величина BO также возрастала, в результате чего пламя ускорялось сильнее.

Стоит отметить, что при относительно малых значениях BO (приблизительно до 0,2) скорость пламени в преградах выходила на установившиеся значения (плато). При этом в случаях, где плато отсутствует, можно сделать предположение о том, что пламя выходит из контрольного объема быстрее, чем успевает достичь своей максимальной скорости в нем.

После достижения пламенем крайней точки контрольного объема (точка «С», $\overline{X_k}$ = 6,26) преграды отсутствуют, поэтому параметрам θ и BO присваиваются нулевые значения. При этом начальное условие для движения за преградами для скорости $V_1(t_k)$ сохраняется. Начиная с этой точки, знаменатель турбулентной скорости горения в уравнениях (10)–(12) с увеличением времени растет моделируя диссипа-

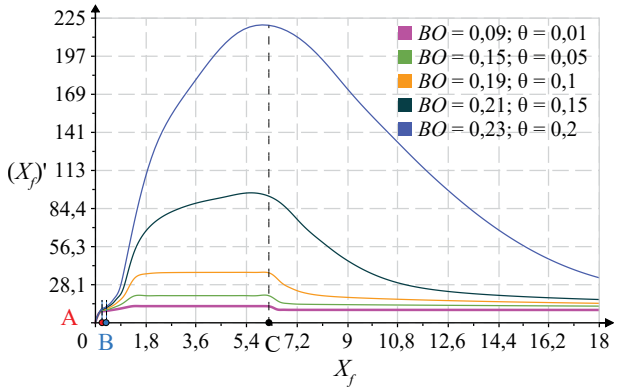


Рис. 1. Зависимости безразмерной видимой скорости пламени $(X_f)'$ от безразмерного положения X_f при d = 1 см
Fig. 1. Dependences of dimensionless apparent flame speed $(X_f)'$ on dimensionless position X_f at d = 1 cm

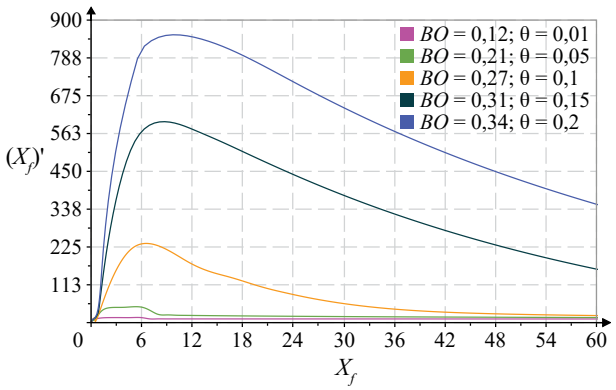


Рис. 3. Зависимости безразмерной видимой скорости пламени $(X_f)'$ от безразмерного положения X_f при d = 3 см
Fig. 3. Dependences of dimensionless apparent flame speed $(X_f)'$ on dimensionless position X_f at d = 3 cm

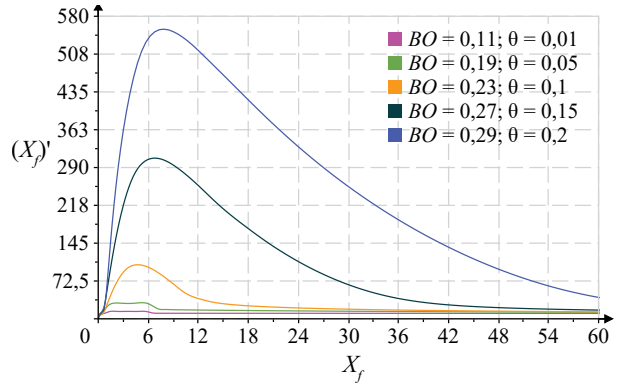


Рис. 2. Зависимости безразмерной видимой скорости пламени $(X_f)'$ от безразмерного положения X_f при d = 2 см
Fig. 2. Dependences of dimensionless apparent flame speed $(X_f)'$ on dimensionless position X_f at d = 2 cm

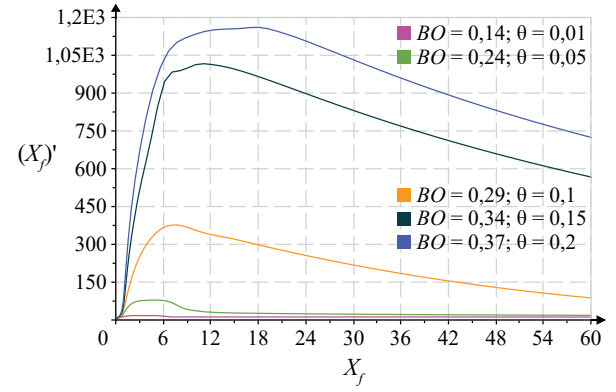


Рис. 4. Зависимости безразмерной видимой скорости пламени $(X_f)'$ от безразмерного положения X_f при d = 4 см
Fig. 4. Dependences of dimensionless apparent flame speed $(X_f)'$ on dimensionless position X_f at d = 4 cm

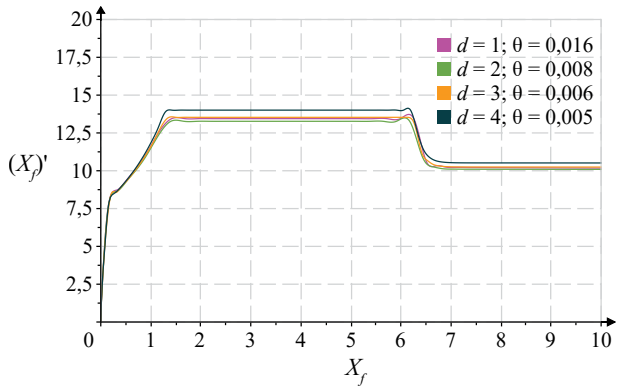


Рис. 5. Зависимости безразмерной видимой скорости пламени $(X_f)'$ от безразмерного положения X_f при BO = 0,1
Fig. 5. Dependences of dimensionless apparent flame speed $(X_f)'$ on dimensionless position X_f at BO = 0.1

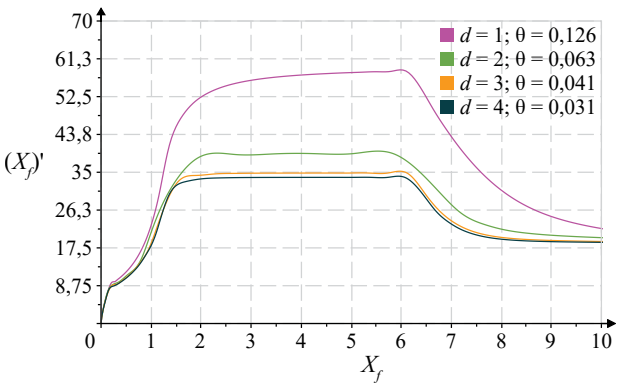


Рис. 6. Зависимости безразмерной видимой скорости пламени $(X_f)'$ от безразмерного положения X_f при BO = 0,2
Fig. 6. Dependences of dimensionless apparent flame speed $(X_f)'$ on dimensionless position X_f at BO = 0.2

цию кинетической турбулентной энергии. В результате скорость пламени при дальнейшем движении вдоль трубы снижалась.

Максимальная размерная скорость пламени, полученная при заданной конфигурации преград (d = 1 см и θ = 0,2), в соответствии с рис. 1 приблизительно равна 88 м/с. При таких параметрах значение блокирующего отношения оказалось самым большим из исследованных для указанного диаметра. Можно утверждать, что при дальнейшем увеличении загроможденности контрольного объема (т.е. при увеличении количества преград в контрольном объеме) скорость будет возрастать сильнее, за исключением тех случаев, где достигнуто плато.

Похожую картину можно видеть также на рис. 2–4.

Наибольшие значения скорости пламени были получены при d = 2 см, θ = 0,2 (рис. 2); d = 3 см, θ = 0,2 (рис. 3); d = 4 см, θ = 0,2 (рис. 4). Значения размерной скорости пламени составили приблизительно 207, 342 и 465 м/с соответственно.

При относительно больших значениях BO (0,27–0,34) можно наблюдать достаточно сильное ускорение пламени. Предположительно, в таких случаях скорость пламени далека от своего максимального значения и слишком быстро достигает конца участка с преградами.

При выбранных аналогично рис. 1 значениях θ, но разных d, меняются и величины BO. Поэтому целесообразно оценить исследуемую зависимость при различных размерах преград в пределах одной величины блокирующего отношения. Как и в предыдущем случае, регулирование значения BO производилось посредством изменения количества преград в контрольном объеме.

На рис. 5 картина перемещения пламени вдоль трубы аналогична предыдущим рассматриваемым случаям.

При этом здесь блокирующее отношение невелико, а увеличение диаметра преград не приводит к сильному росту загроможденности и, следовательно, к сильному ускорению пламени. Поэтому в рассматриваемых случаях максимальную размерную скорость пламени при любом размере преград можно считать приблизительно равной 5,5 м/с.

Значительные изменения можно наблюдать при BO = 0,2 (рис. 6). В этом случае сильно выделяется кривая при d = 1 см. Здесь количество преград, необходимое для того, чтобы обеспечить требуемое значение BO, составило 385, когда при d = 2 см для заданного блокирующего отношения необходимо 48 преград. В первом случае загроможденность контрольного объема оказалась больше, а следовательно, и ускорение пламени в таком объеме будет сильнее.

Максимальная размерная скорость пламени в зоне с преградами при d = 1 см приблизительно равна 24 м/с.

В соответствии с рис. 7, наибольшее ускорение также достигается при наименьшем диаметре преград (d = 1 см) за счет наибольшего количества преград, необходимых для обеспечения заданного BO и, как следствие, наибольшей загроможденности θ = 0,25.

Максимальная размерная скорость при d = 1 см составила примерно 178 м/с, а закономерность

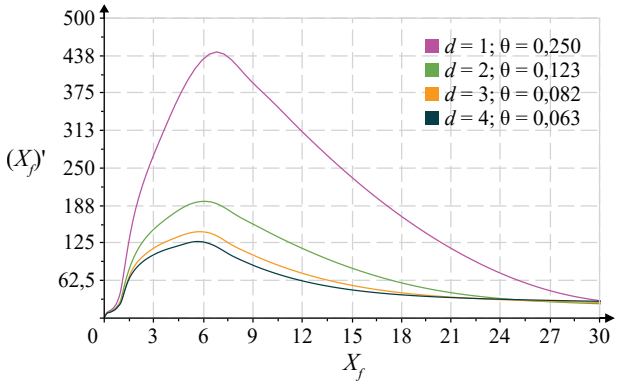


Рис. 7. Зависимости безразмерной видимой скорости пламени $(X_f)'$ от безразмерного положения X_f при BO = 0,25
Fig. 7. Dependences of dimensionless apparent flame speed $(X_f)'$ on dimensionless position X_f at BO = 0.25

роста интенсивности ускорения с ростом размера преград осталась аналогичной рис. 6.

Выводы

Преимуществом разработанной гидравлической модели турбулентного горения в преградах является возможность использовать экспериментальные данные при проведении расчета, в том числе для случая массива преград [31].

Модель позволила адекватно рассчитать для различных конфигураций массива преград значения скорости и давления, выявить влияние разных факторов (BO, θ, d) на скорость горения в этом массиве.

Было качественно показано, что размер преград (средний диаметр стержня d), как и их количество, напрямую влияют на интенсивность ускорения пламени при его прохождении через эти преграды в заданном контрольном объеме.

С увеличением размера или количества преград на единицу объема увеличивается их блокирующее отношение, а также объемная загроможденность свободного пространства. В свою очередь, величина блокирующего отношения напрямую связана с эффективной скоростью горения, т.е. с увеличением BO увеличивается скорость потока V_1, за счет чего растет турбулентная составляющая эффективной скорости горения, а следовательно, и видимая скорость пламени.

Полученные результаты не противоречат имеющимся экспериментальным данным, представленным в других работах, и позволяют верифицировать полученную модель результатами экспериментов в будущем, а простота структуры модели – совершенствовать ее (учитывать различные факторы).

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. *Bradley D., Chamberlain G.A., Drysdale D.D.* Large vapour cloud explosions, with particular reference to that at Buncefield // Philosophical Transactions of the Royal Society A: Mathematical, Physical and Engineering Sciences. 2012. Vol. 370. Pp. 544–566. DOI: 10.1098/rsta.2011.0419
2. *Strehlow R.A.* Unconfined vapour-cloud explosions : an overview // 14th Syrup. (Int.) on Combustion. The Combustion Institute. 1973. Pp. 1189–1200. DOI: 10.1016/S0082-0784(73)80107-9
3. *Chamberlain G., Oran E., Pekalski A.* Detonations in industrial vapour cloud explosions // Journal of Loss Prevention in the Process Industries. 2019. Vol. 62. DOI: 10.1016/j.jlp.2019.103918
4. *Moen I.O., Donato M., Knystautas R., Lee J.H.* Flame acceleration due to turbulence produced by obstacles // Combustion and Flame. 1980. Vol. 3. Issue 1. Pp. 21–32. DOI: 10.1016/0010-2180(80)90003-6
5. *Moen I.O., Donato M., Knystautas R., Lee J.H., Wagner H.Gg.* Turbulent flame propagation and acceleration in the presence of obstacles // Prog. Astronautics and Aeronautics. 1981. Vol. 75. Pp. 33–47.
6. *Chan C., Moen I.O., Lee J.H.S.* Influence of confinement on flame acceleration due to repeated obstacles // Combustion and Flame. 1983. Vol. 49. Issues 1–3. Pp. 27–39. DOI: 10.1016/0010-2180(83)90148-7
7. *Teodorczyk A., Lee J.H.S., Knystautas R.* The structure of fast turbulent flames in very rough, obstacle-filled channels // Symposium (International) on Combustion. 1991. Vol. 23. Issue 1. Pp. 735–741. DOI: 10.1016/S0082-0784(06)80324-3
8. *Li R., Luo Zh., Cheng F., Wang T., Lin H., Liu H.* A comparative investigation of premixed flame propagating of combustible gases-methane mixtures across an obstructed closed tube // Fuel. 2021. Vol. 289. DOI: 10.1016/j.fuel.2020.119766
9. *Xing H., Qiu Ya., Sun S., Wang M., Li B., Xie L.* Experimental study of overpressure and temperature field behaviors of a methane-air mixture with different ignition positions, solid structure obstacles and initial turbulence levels // Fuel. 2020. Vol. 287. DOI: 10.1016/j.fuel.2020.119446
10. *Yakush S., Semenov O., Alexeev M.* Premixed propane — air flame propagation in a narrow channel with obstacles // Energies. 2023. Vol. 16. Issue 3. P. 1516. DOI: 10.3390/en16031516. EDN KLWHDW.
11. *Du Ya., Li G., Wang Sh., Qi Sh., Li Ya., Wang B.* Effects of obstacle number on characteristics of vented gasoline-air mixture explosions // CIESC Journal. 2017. Vol. 68. Issue 7. Pp. 2946–2955. URL: https://hgxb.cip.com.cn/EN/10.11949/j.issn.0438-1157.20161612
12. *Gubba S.R., Ibrahim S.S., Malalasekera W., Masri A.R.* LES Modeling of premixed deflagrating flames in a small-scale vented explosion chamber with a series of solid obstructions // Combustion Science and Technology. 2008. Vol. 180. Issues 10–11. Pp. 1936–1955. DOI: 10.1080/00102200802261852
13. *Gamezo V.N., Ogawa T., Oran E.S.* Flame acceleration and DDT in channels with obstacles: Effect of obstacle spacing // Combustion and Flame. 2008. Vol. 155. Issues 1–2. Pp. 302–315. DOI: 10.1016/j.combustflame.2008.06.004
14. *Elshimy M., Ibrahim S., Malalasekera W.* LES — DFSD modelling of vented hydrogen explosions in a small-scale combustion chamber // Journal of Loss Prevention in the Process Industries. 2021. Vol. 72. DOI: 10.1016/j.jlp.2021.104580

15. *Li J., Hao H., Shi Ya., Fang Q., Li Zh., Chen L.* Experimental and computational Fluid Dynamics study of separation gap effect on gas explosion mitigation for methane storage tanks // Journal of Loss Prevention in the Process Industries. 2018. Vol. 55. Pp. 359–380. DOI: 10.1016/j.jlp.2018.07.008
16. *Горев В.А., Мирошников С.Н.* Ускоряющееся горение в газовых объемах // Химическая физика. 1982. № 6. С. 854–858.
17. *Dörge K.J., Pangritz D., Wagner H.Gg.* Experiments on velocity augmentation of spherical flames by grids // Acta Astroanautica. 1976. Vol. 3. Issues 11–12. Pp. 1067–1076. DOI: 10.1016/0094-5765(76)90013-8
18. *Na'inna A.M., Phylaktou H.N., Andrews G.E.* The acceleration of flames in tube explosions with two obstacles as a function of the obstacle separation distance // Journal of Loss Prevention in the Process Industries. 2013. Vol. 26. Issue 6. Pp. 1597–1603. DOI: 10.1016/j.jlp.2013.08.003
19. *Na'inna A.M., Somuano G.B., Phylaktou H.N., Andrews G.E.* Flame acceleration in tube explosions with up to three flat-bar obstacles with variable obstacle separation distance // Journal of Loss Prevention in the Process Industries. 2015. Vol. 38. Pp. 119–124. DOI: 10.1016/j.jlp.2015.08.009
20. *Li G., Du Ya., Liang J., Wang Sh., Wang B., Qi Sh.* Characteristics of gasoline — air mixture explosions with different obstacle configurations // Journal of the Energy Institute. 2017. Vol. 91. Issue 2. Pp. 194–202. DOI: 10.1016/j.joei.2017.01.001
21. *Na'inna A.M., Phylaktou H.N., Andrews G.E.* Acceleration of flames in tube explosions with two obstacles as a function of the obstacle separation distance: the influence of mixture reactivity // Proc. of the Seventh International Seminar on Fire & Explosion Hazards (ISFEH7). 2013. Pp. 627–636. DOI: 10.3850/978-981-07-5936-0_10-02
22. *Masri A.R., Ibrahim S.S., Nehzat N., Green A.R.* Experimental study of premixed flame propagation over various solid obstructions // Experimental Thermal and Fluid Science. 2000. Vol. 21. Issues 1–3. Pp. 109–116. DOI: 10.1016/S0894-1777(99)00060-6
23. *Xiao G., Wang Sh., Mi H., Khan F.* Analysis of obstacle shape on gas explosion characteristics // Process Safety and Environmental Protection. 2022. Vol. 161. Pp. 78–87. DOI: 10.1016/j.psep.2022.03.019
24. *Xiao H., Oran E.S.* Flame acceleration and deflagration-to-detonation transition in hydrogen-air mixture in a channel with an array of obstacles of different shapes // Combustion and Flame. 2020. Vol. 220. Pp. 378–393. DOI: 10.1016/j.combustflame.2020.07.013
25. *Горев В.А., Федотов В.Н.* Экспериментальное изучение влияния загроможденности пространства на скорость горения газов // Физика горения и взрыва. 1986. № 6 (22). С. 79–83.
26. *Чида В.К.* Экспериментальное исследование структуры течения и характеристик пламени в потоке с двухрядной системой препятствий // Физика горения и взрыва. 2021. № 3 (57). С. 34–48. DOI: 10.15372/FGV20210303
27. *Feng X., Zhang H., Si F., Dou J., Li M., Wu L., et al.* Suppression characteristics of multi-layer metal wire mesh on premixed methane-air flame propagation // Front. Mater. 2023. Vol. 10. DOI: 10.3389/fmats.2023.1107133
28. *Huang J., Gao X., Wang Ch.* Flame acceleration and deflagration-to-detonation transition in narrow channels with thin obstacles // Modern Physics Letters B. 2018. Vol. 32. Issue 29. DOI: 10.1142/S0217984918503542
29. *Lu X., Kaplan C.R., Oran E.S.* Predictions of flame acceleration, transition to detonation, and detonation propagation using the Chemical-Diffusive Model // Combustion and Flame. 2022. Vol. 235. DOI: 10.1016/j.combustflame.2021.111705
30. *Wang J., Zhao X., Fan L., Pan J., Zhu Yu.* Effects of the quantity and arrangement of reactive jet obstacles on flame acceleration and transition to detonation : a numerical study // Aerospace Science and Technology. 2023. Vol. 137. DOI: 10.1016/j.ast.2023.108269
31. *Phylaktou H., Andrews G.E.* The acceleration of flame propagation in a tube by an obstacle // Combustion and Flame. 1991. Vol. 85. Issues 3–4. Pp. 363–379. DOI: 10.1016/0010-2180(91)90140-7
32. *Bradley D.* How fast can we burn? // Symposium (International) on Combustion. 1992. Vol. 24. Issue 1. Pp. 247–262. DOI: 10.1016/S0082-0784(06)80034-2

REFERENCES

1. Bradley D., Chamberlain G.A., Drysdale D.D. Large vapour cloud explosions, with particular reference to that at Buncefield. *Philosophical Transactions of the Royal Society A: Mathematical, Physical and Engineering Sciences*. 2012; 370:544-566. DOI: 10.1098/rsta.2011.0419
2. Strehlow R.A. Unconfined vapour-cloud explosions : an overview. *14th Syrup. (Int.) on Combustion. The Combustion Institute*. 1973; 1189-1200. DOI: 10.1016/S0082-0784(73)80107-9
3. Chamberlain G., Oran E., Pekalski A. Detonations in industrial vapour cloud explosions. *Journal of Loss Prevention in the Process Industries*. 2019; 62. DOI: 10.1016/j.jlp.2019.103918
4. Moen I.O., Donato M., Knystautas R., Lee J.H. Flame acceleration due to turbulence produced by obstacles. *Combustion and Flame*. 1980; 3(1):21-32. DOI: 10.1016/0010-2180(80)90003-6

5. Moen I.O., Donato M., Knystautas R., Lee J.H., Wagner H.Gg. Turbulent flame propagation and acceleration in the presence of obstacles. *Prog. Astronautics and Aeronautics*. 1981; 75:33-47.
6. Chan C., Moen I.O., Lee J.H.S. Influence of confinement on flame acceleration due to repeated obstacles. *Combustion and Flame.* 1983; 49(1-3):27-39. DOI: 10.1016/0010-2180(83)90148-7
7. Teodorczyk A., Lee J.H.S., Knystautas R. The structure of fast turbulent flames in very rough, obstacle-filled channels. *Symposium (International) on Combustion.* 1991; 23(1):735-741. DOI: 10.1016/S0082-0784(06)80324-3
8. Li R., Luo Zh., Cheng F., Wang T., Lin H., Liu H. A comparative investigation of premixed flame propagating of combustible gases-methane mixtures across an obstructed closed tube. *Fuel.* 2021; 289. DOI: 10.1016/j.fuel.2020.119766
9. Xing H., Qiu Ya., Sun S., Wang M., Li B., Xie L. Experimental study of overpressure and temperature field behaviors of a methane-air mixture with different ignition positions, solid structure obstacles and initial turbulence levels. *Fuel.* 2020; 287. DOI: 1016/j.fuel.2020.119446
10. Yakush S., Semenov O., Alexeev M. Premixed propane — air flame propagation in a narrow channel with obstacles. *Energies.* 2023; 16(3):1516. DOI: 10.3390/en16031516. EDN KLWHDW.
11. Du Ya., Li G., Wang Sh., Qi Sh., Li Ya., Wang B. Effects of obstacle number on characteristics of vented gasoline-air mixture explosions. *CIESC Journal*. 2017; 68(7):2946-2955. URL: https://hgxb.cip.com.cn/EN/10.11949/j.issn.0438-1157.20161612
12. Gubba S.R., Ibrahim S.S., Malalasekera W., Masri A.R. LES Modeling of premixed deflagrating flames in a small-scale vented explosion chamber with a series of solid obstructions. *Combustion Science and Technology*. 2008; 180(10-11):1936-1955. DOI: 10.1080/00102200802261852
13. Gamezo V.N., Ogawa T., Oran E.S. Flame acceleration and DDT in channels with obstacles: Effect of obstacle spacing. *Combustion and Flame*. 2008; 155(1-2):302-315. DOI: 10.1016/j.combustflame.2008.06.004
14. Elshimy M., Ibrahim S., Malalasekera W. LES – DFSD modelling of vented hydrogen explosions in a small-scale combustion chamber. *Journal of Loss Prevention in the Process Industries.* 2021; 72. DOI: 10.1016/j.jlp.2021.104580
15. Li J., Hao H., Shi Ya., Fang Q., Li Zh., Chen L. Experimental and computational Fluid Dynamics study of separation gap effect on gas explosion mitigation for methane storage tanks. *Journal of Loss Prevention in the Process Industries.* 2018; 55:359-380. DOI: 10.1016/j.jlp.2018.07.008
16. Gorev V.A., Miroshnikov S.N. The accelerating combustion in gas volumes. *Chemical Physics*. 1982; 854-858 (rus).
17. Dörge K.J., Pangritz D., Wagner H.Gg. Experiments on velocity augmentation of spherical flames by grids. *Acta Astroanautica*. 1976; 3(11-12):1067-1076. DOI: 10.1016/0094-5765(76)90013-8
18. Na'inna A.M., Phylaktou H.N., Andrews G.E. The acceleration of flames in tube explosions with two obstacles as a function of the obstacle separation distance. *Journal of Loss Prevention in the Process Industries.* 2013; 26(6):1597-1603. DOI: 10.1016/j.jlp.2013.08.003
19. Na'inna A.M., Somuano G.B., Phylaktou H.N., Andrews G.E. Flame acceleration in tube explosions with up to three flat-bar obstacles with variable obstacle separation distance. *Journal of Loss Prevention in the Process Industries*. 2015; 38:119-124. DOI: 10.1016/j.jlp.2015.08.009
20. Li G., Du Ya., Liang J., Wang Sh., Wang B., Qi Sh. Characteristics of gasoline–air mixture explosions with different obstacle configurations. *Journal of the Energy Institute*. 2017; 91(2):194-202. DOI: 10.1016/j.joei.2017.01.001
21. Na'inna A.M., Phylaktou H.N., Andrews G.E. Acceleration of flames in tube explosions with two obstacles as a function of the obstacle separation distance: the influence of mixture reactivity. *Proc. Of the Seventh International Seminar on Fire & Explosion Hazards (ISFEH7).* 2013; 627-636. DOI: 10.3850/978-981-07-5936-0_10-02
22. Masri A.R., Ibrahim S.S., Nehzat N., Green A.R. Experimental study of premixed flame propagation over various solid obstructions. *Experimental Thermal and Fluid Science.* 2000; 21(1-3):109-116. DOI: 10.1016/S0894-1777(99)00060-6
23. Xiao G., Wang Sh., Mi H., Khan F. Analysis of obstacle shape on gas explosion characteristics. *Process Safety and Environmental Protection*. 2022; 1616:78-87. DOI: 10.1016/j.psep.2022.03.019
24. Xiao H., Oran E.S. Flame acceleration and deflagration-to-detonation transition in hydrogen-air mixture in a channel with an array of obstacles of different shapes. *Combustion and Flame*. 2020; 220:378-393. DOI: 10.1016/j.combustflame.2020.07.013
25. Gorev V.A., Fedotov V.N. Experimental study of the effect of overloading of a space on the rate of combustion of gases.*Combustion, Explosion and Shock Waves.* 1986; 22(6):713-717. DOI: 10.1007/BF00751878
26. Cheeda V.K. Experimental investigation of flame propagation caused by interfaces of the flame, turbulence eddies, and negative shock waves. *Combustion, Explosion and Shock Waves.* 2021; 57(3):285-298. DOI: 10.1134/S0010508221030035
27. Feng X., Zhang H., Si F., Dou J., Li M., Wu L., et al. Suppression characteristics of multi-layer metal wire mesh on premixed methane-air flame propagation. *Front. Mater.* 2023; 10. DOI: 10.3389/fmats.2023.1107133
28. Huang J., Gao X., Wang Ch. Flame acceleration and deflagration-to-detonation transition in narrow channels with thin obstacles. *Modern Physics Letters B*. 2018; 32(29). DOI: 10.1142/S0217984918503542
29. Lu X., Kaplan C.R., Oran E.S. Predictions of flame acceleration, transition to detonation, and detonation propagation using the Chemical-Diffusive Model. *Combustion and Flame*. 2022; 235. DOI: 10.1016/j.combustflame.2021.111705

30. Wang J., Zhao X., Fan L., Pan J., Zhu Yu. Effects of the quantity and arrangement of reactive jet obstacles on flame acceleration and transition to detonation : a numerical study. *Aerospace Science and Technology*. 2023; 137. DOI: 10.1016/j.ast.2023.108269
31. Phylaktou H., Andrews G.E. The acceleration of flame propagation in a tube by an obstacle. *Combustion and Flame*. 1991; 85(3-4):363-379. DOI: 10.1016/0010-2180(91)90140-7
32. Bradley D. How fast can we burn? *Symposium (International) on Combustion.* 1992; 24(1):247-262. DOI: 10.1016/S0082-0784(06)80034-2

Поступила 04.07.2024, после доработки 18.07.2024;
принята к публикации 29.07.2024
Received July 4, 2024; Received in revised form July 18, 2024;
Accepted July 29, 2024

Информация об авторах

ГОРЕВ Вячеслав Александрович, д-р физ.-мат. наук, профессор, профессор кафедры комплексной безопасности в строительстве, Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет, Россия, 129337, г. Москва, Ярославское шоссе, 26; РИНЦ ID: 690901; Scopus AuthorID: 7003846069; ResearcherID: AAD-7691-2022; ORCID: 0000-0002-5096-6722; e-mail: va.gorev@yandex.ru

РУКАВИШНИКОВ Максим Михайлович, 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; ID RISC: 1128857, ORCID: 0009-0001-3510-9298; e-mail: rukavishnikov3.5.1@yandex.ru

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

Information about the authors

Vyacheslav A. GOREV, Dr. Sci. (Phys.-Math.), Professor, Professor of Department of Integrated Safety in Civil Engineering, Moscow State University of Civil Engineering (National Research University), Yaroslavskoe Shosse, 26, Moscow, 129337, Russian Federation; ID RISC: 690901; Scopus AuthorID: 7003846069; ResearcherID: AAD-7691-2022; ORCID: 0000-0002-5096-6722; e-mail: va.gorev@yandex.ru

Maxim M. RUKAVISHNIKOV, Researcher, All-Russian Research Institute for Fire Protection of Ministry of Russian Federation for Civil Defense, Emergencies and Elimination of Consequences of Natural Disasters, VNIIPO, 12, Balashikha, Moscow Region, 143903, Russian Federation; ID RISC: 1128857, ORCID: 0009-0001-3510-9298; e-mail: rukavishnikov3.5.1@yandex.ru

Contribution of the authors: *all authors have made an equivalent contribution to the preparation of the publication.*
The authors declare that there is no conflict of interest.

ПОЖАРОВЗРЫВОБЕЗОПАСНОСТЬ/FIRE AND EXPLOSION SAFETY. 2024. Т. 33. № 5. С. 16–25
POZHAROVZRYVOBEZOPASNOST/FIRE AND EXPLOSION SAFETY. 2024; 33(5):16-25

НАУЧНАЯ СТАТЬЯ/RESEARCH PAPER

УДК 614.841.332:624.012.4

https://doi.org/10.22227/0869-7493.2024.33.05.16-25

Анализ теплового воздействия на окна лестничной клетки пожара, возникшего на балконе жилого здания

Сергей Викторович Пузач[1], Сергей Алексеевич Лучкин[2], Александр Васильевич Гомозов[2] ✉

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

[2] 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. Положения нормативных документов в области пожарной безопасности содержат требования по ограничению распространения пожара по плоскому фасаду здания в оконные и дверные проемы лестничных клеток в виде требований к ширине глухих простенков, но не содержат соответствующих требований к расстояниям между балконами и окнами лестничных клеток. Для обоснования этих требований в настоящей статье проведен анализ теплового воздействия на окна лестничных клеток пожара, возникшего на балконе жилого здания.
Цели и задачи. Целью настоящей статьи является расчетная оценка полей температур и тепловых потоков в зоне светопрозрачного заполнения проемов лестничных клеток в зависимости от конструктивного исполнения балконов, размеров простенков, а также возможной скорости ветра в районе застройки.
Методы. Для решения поставленных задач применены аналитические и математические методы исследования, в том числе математические методы моделирования распространения ОФП — полевое (CFD) моделирование динамики пожара.
Результаты. Получены расчетные данные, позволяющие оценить тепловое воздействие на окна лестничных клеток пожара, возникшего на балконе жилого здания в зависимости от конструктивного исполнения балконов, размеров простенков, а также возможной скорости ветра в районе застройки.
Заключение. На основе исследований получены расчетные данные для оценки теплового воздействия пожара, возникшего на балконе жилого здания и распространяющегося по фасаду, на оконные проемы лестничной клетки. Полученные данные позволяют оценить влияние конструктивного исполнения балконов, скорости ветра в районе размещения объекта, а также размера простенка на температурные поля и тепловые потоки в зоне оконного остекления лестничной клетки, а на этой основе внести необходимые дополнения и уточнения в требования нормативных документов по анализируемому вопросу.

Ключевые слова: конструктивное исполнение балконов; размер простенка; предельные значения температур; предельные значения тепловых потоков; математическая модель

Для цитирования: *Пузач С.В., Лучкин С.А., Гомозов А.В.* Анализ теплового воздействия на окна лестничной клетки пожара, возникшего на балконе жилого здания // Пожаровзрывобезопасность/Fire and Explosion Safety. 2024. Т. 33. № 5. С. 16–25. DOI: 10.22227/0869-7493.2024.33.05.16-25

✉ *Гомозов Александр Васильевич,* e-mail: gomozovav@yandex.ru

Analysis of the thermal impact on the stairwell windows of a fire that occurred on the balcony of a residential building

Sergey V. Puzach[1], Sergey A. Luchkin[2], Alexander V. Gomozov[2] ✉

[1] Academy of State fire service of the Ministry of Russian Federation for Civil Defense, Emergency situations and disaster relief Viy, Moscow, Russian Federation

[2] All-Russian Order of the Badge of Honor, Research Institute of Fire Defense of the Ministry of the Russian Federation for Civil Defense, Emergencies and Disaster Relief, Moscow Region, Balashikha, Russian Federation

ABSTRACT

Introduction. The provisions of regulatory documents in the field of fire safety contain requirements for limiting the spread of fire along the flat facade of a building into window and door openings of staircases in the form of

 © С.В. Пузач, С.А. Лучкин, А.В. Гомозов, 2024

requirements for the width of blind partitions, but do not contain corresponding requirements for the distances between balconies and windows of staircases. To substantiate these requirements, this paper analyzes the thermal impact on the stairwell windows of a fire that occurred on the balcony of a residential building.
Aims and objectives. The aim of this paper is to calculate the temperature fields and heat flows in the zone of translucent filling of staircase openings, depending on the design of the balconies, the size of the partitions, as well as the possible wind speed in the building area.
Methods. To solve the assigned problems, analytical and mathematical research methods were used, including mathematical methods for modelling the propagation of general physical properties — field (CFD) modelling of fire dynamics.
Results. Calculation data are obtained to evaluate the thermal impact on the stairwell windows of a fire that occurred on the balcony of a residential building, depending on the design of the balconies, the size of the partitions, as well as the possible wind speed in the building area.
Conclusion. Based on the research, calculated data were obtained to assess the thermal impact of a fire that broke out on the balcony of a residential building and spread along the facade to the window openings of the staircase. The data obtained make it possible to evaluate the influence of the design of balconies, wind speed in the area where the facility is located, as well as the size of the partition on the temperature fields and heat flows in the window glazing area of the staircase, and on this basis — to make the necessary additions and clarifications to the requirements of regulatory documents on the issue being analyzed.

Keywords: structural design of balconies; partition size; limit values of temperatures; limit values of heat fluxes; mathematical model

For citation: Puzach S.V., Luchkin S.A., Gomozov A.V. Analysis of the thermal impact on the stairwell windows of a fire that occurred on the balcony of a residential building. *Pozharovzryvobezopasnost/Fire and Explosion Safety*. 2024; 33(5):16-25. DOI: 10.22227/0869-7493.2024.33.05.16-25 (rus).

✉ *Alexander Vasilievich Gomozov,* e-mail: gomozovav@yandex.ru

Введение

Положениями нормативных документов в области пожарной безопасности предусмотрен комплекс требований, направленных на ограничение распространения опасных факторов пожара (ОФП) по плоскому фасаду здания из окон горящих помещений в оконные проемы лестничных клеток.

Применительно к лестничным клеткам типа Л1, Н2 и Н3 перечисленные требования изложены в СП 2.13130.2020[1] в виде требований к ширине простенков — глухих участков плоской наружной стены с нормируемым пределом огнестойкости, расположенных между смежными по горизонтали проемами (оконными или иными проемами) или участками светопрозрачной конструкции с ненормируемым пределом огнестойкости.

Данные требования учитывают такие особенности помещений, примыкающих к лестничной клетке, как класс их функциональной пожарной опасности, категорию по пожарной и взрывопожарной опасности, а также факт защиты помещений автоматическими системами пожаротушения.

Однако нормативные документы не содержат требований к размеру простенков между балконами (лоджиями) и окнами лестничных клеток с учетом конструктивных особенностей балконов, а также возможной скорости ветра в районе застройки.

Для обоснования технических решений по защите лестничных клеток от распространения пожара по фасаду в случае горения балкона необходимо проанализировать возможные конструкции балконов.

Наиболее часто балконы проектируются в жилых многоквартирных зданиях. При этом под балконом в жилом многоквартирном здании понимается выступающая из плоскости наружной стены огражденная площадка, имеющая ограниченную глубину, взаимоувязанную с освещением примыкающего помещения, которая может выполняться с покрытием и остеклением.

Для оценки пожарной опасности конструкции балконов следует разделять на следующие основные типы:

- открытые балконы, не имеющие сплошных вертикальных ограждений (в том числе не имеющие сплошных нижних экранов-ограждений), у которых внутреннее металлическое ограждение не препятствует притоку внешнего воздуха и распространению продуктов горения с балкона на фасад здания;
- частично-открытые балконы, у которых вертикальное ограждение включает в себя только сплошной не светопрозрачный нижний экран из негорючих материалов (кирпич, бетон и т.д.) или светопрозрачный нижний экран, а горизонтальным ограждением является перекрытие балкона вышележащего этажа или покрытие;
- балконы с балконным остеклением (ленточное остекление), выполненным от сплошного не светопрозрачного нижнего экрана из негорючих материалов (кирпич, бетон и т.д.) до перекрытия балкона вышележащего этажа;

[1] СП 2.13130.2020. Системы противопожарной защиты. Обеспечение огнестойкости объектов защиты.

- балконы с панорамным остеклением (с нижним экраном из безопасного остекления и балконным остеклением).

Светопрозрачное заполнение ленточного и панорамного остекления может быть выполнено одинарным листовым флоат-стеклом, а также всеми видами специальных стекол (например, закаленным стеклом), а при заполнении нижнего экрана панорамного остекления в качестве светопрозрачного заполнения нижнего экрана применяют только безопасное закаленное стекло или многослойное. При этом высота нижнего экрана от уровня перекрытия принимается равной 1,2 м.

Очевидно, что распространение опасных факторов пожара с фасада здания в объем лестничной клетки возможно как в случае, когда тепловое воздействие пожара приведет к разрушению оконного остекления при закрытых створках окон, так и в случае, когда створки окон лестничной клетки в момент пожара открыты полностью или частично. При этом сочетание частично-открытых створок лестничной клетки с разрушением оконного остекления под воздействием пожара значительно ускорит блокирование лестничной клетки опасными факторами пожара.

Таким образом, анализ возможности разрушения оконного остекления в лестничной клетке при тепловом воздействии пожара при пожаре на балконе является необходимым элементом для оценки безопасности лестничной клетки при пожаре как в случае закрытых створок, так и в случае частично-открытых створок.

С учетом этого целью настоящей статьи является расчетная оценка полей температур и тепловых потоков в зоне оконных проемов лестничных клеток при пожаре на балконе жилого здания в зависимости от конструктивного исполнения балконов, размеров простенков на плоском фасаде, а также возможной скорости ветра в районе застройки применительно к задаче оценки возможности разрушения оконного остекления.

Кроме того, целью статьи является апробация полученных результатов для обоснования минимально необходимых размеров простенков, позволяющих исключить разрушение оконного остекления вследствие теплового воздействия пожара на балконе.

Используемые математические соотношения и исходные данные

Современные научные подходы предполагают не только возможность, но и целесообразность обоснования противопожарных требований по защите оконных проемов лестничных клеток от теплового воздействия пожара, возникшего на балконе жилого здания на основе использования разнообразных математических моделей, описывающих термогазодинамические параметры пожара отечественных [1–4] и зарубежных[2, 3, 4] [5] авторов.

Данные математические модели в сочетании с программными комплексами [6] и другим позволяют обеспечить возможность анализа различных факторов на динамику распространения опасных факторов пожара как в жилом помещении, так и за его пределами.

Вместе с тем, как показано в [7–9], результаты расчетов в значительной степени зависят от пожарной опасности находящейся в помещении горючей нагрузки и ее количества. Кроме того, на результаты расчетов влияют условия размещения пожарной нагрузки в жилом помещении [10, 11].

Исходя из вышеизложенного, при выборе математической модели и исходных данных учитывались следующие обстоятельства.

Необходимость расчета параметров пожара за пределами горящей квартиры и балкона с учетом влияния скорости ветра обуславливает необходимость использования полевого метода моделирования динамики развития и распространения пожара.

Кроме того, поскольку целью защиты оконных проемов лестничных клеток от теплового воздействия пожара является обеспечение возможности безопасной эвакуации людей по лестничной клетке, то указанное обоснование должно базироваться на тех же методологических положениях, что и обоснование возможности безопасной эвакуации людей по лестничной клетке при распространении в нее ОФП из помещений, коридоров и т.д.

Данные обстоятельства обуславливают необходимость проведения обоснования противопожарных требований по защите оконных проемов лестничных клеток от теплового воздействия пожара, возникшего на балконе жилого здания, на основе базовых положений используемой в отечественной практике методики расчета пожарного риска[5].

---

[2] Nuclear Safety NEA/CSNI/R. 2017. 14 January 2018. *Investigating Heat and Smoke Propagation Mechanisms in Multi-Compartment Fire Scenarios Final Report of the PRISME Project.* URL: www.oecd-nea.org

[3] McGrattan K., Hostikka S., McDermott S. et al. *Fire dynamics simulator user's guide*. National Institute of Standards and Technology, 2019. 288 p. URL: https://www.thunderheadeng.com/wpcontent/uploads/2013/08/FDS User Guide.

[4] Gilbert S. *Human Behavior in Home Fires, Technical Note (NIST TN)*. National Institute of Standards and Technology, Gaithersburg, MD. DOI: 10.6028/NIST.TN.2191 URL: https://tsapps.nist.gov/publication/get_pdf.cfm?pub_id=933448

[5] Методика определения расчетных величин пожарного риска в зданиях, сооружениях и пожарных отсеках различных классов функциональной пожарной опасности (в ред. приказа МЧС от 14.11.2022 № 1140). URL: https://www.garant.ru/products/ipo/prime/doc/406477165/

Этот подход также позволяет обеспечить возможность дальнейшего интегрирования полученных результатов в указанную методику определения пожарного риска[5].

Для достижения поставленной цели использовано полевое моделирование динамики пожара, основанное на решении системы дифференциальных уравнений, изложенных в методике определения пожарного риска[5].

Модель турбулентности с поправкой на влияние естественной конвекции принята согласно [12, 13].

Теплоперенос излучением учитывался на основе метода дискретного радиационного переноса [14], а радиационные свойства продуктов горения были определены согласно модели взвешенной суммы серых газов [15] с коэффициентами аппроксимации [16].

Пожарная нагрузка принималась равномерно рассредоточенной по квартире и балкону, распространение пожара — круговым, а показатели пожарной опасности горючей нагрузки — в соответствии с методикой определения пожарного риска[5], что позволяет получить результаты расчетов с необходимым запасом по надежности.

При расчетах принималось, что фасад плоский (не имеет выступов), а наружные стены зданий, вдоль которых распространяются продукты горения, выполнены из негорючих материалов.

Скорость ветра варьировалась в наиболее характерном диапазоне, установленном для различных регионов РФ в СП 131.13330.2020[6].

Согласно положениям методики[5], при расчетах должны рассматриваться сценарии пожара и исходные данные, при которых реализуются наихудшие условия для обеспечения безопасности людей. С учетом этого направление ветра принималось вдоль фасада здания от окна горящего балкона к лестничной клетке, что соответствует наиболее критичным условиям. Скорость ветра W и температура воздуха $T_{вх}$ принимались как максимальная из средних скоростей ветра по румбам за январь согласно положениям табл. 3.1 и как температура воздуха с обеспеченностью 0,98 согласно положениям табл. 4.1 СП[6] соответственно. Расчеты проведены для условий Москвы, где значения скорости и температуры воздуха составляют $W = 2$ м/с и $T_{вх} = 26$ °С, а также Каширы и Симферополя, где значения скорости и температуры составляют $W = 4$ м/с, $T_{вх} = 25$ °С и $W = 6$ м/с, $T_{вх} = 30$ °С соответственно.

Оценка теплового воздействия пожара, развивающегося на балконе, на оконные конструкции лестничной клетки проведена для балкона жилого дома,

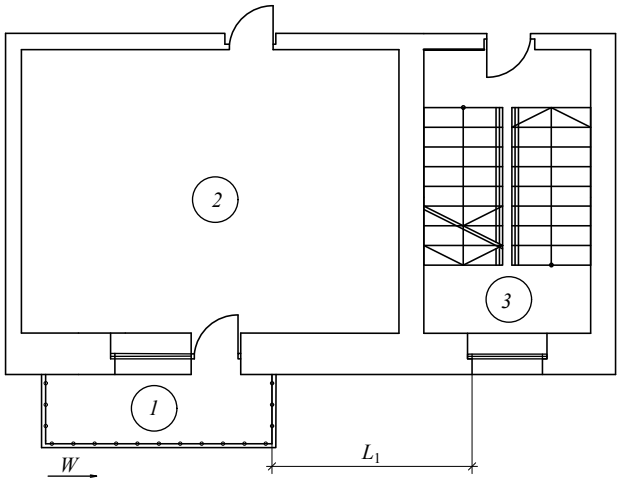


Рис. 1. Анализируемая схема очага пожара на балконе в зоне оконного проема лестничной клетки: *1* — балкон; *2* — примыкающее помещение квартиры; *3* — лестничная клетка; L_1 — простенок; W — скорость ветра

Fig. 1. Analyzed scheme of fire origin on the balcony in the area of the stairwell window opening: *1* — balcony; *2* — adjoining apartment room; *3* — stairwell; L_1 — partition; W — wind speed

имеющего длину 3 м и ширину 1 м (рис. 1). Принималось, что горючая нагрузка на балконе идентична горючей нагрузке в помещениях квартиры.

При расчетах принималось, что примыкающее к балкону жилое помещение имеет площадь 18 м^2, а проем балконной двери имеет размер 0,8 × 1,9 м. Выход на балкон не рассматривался как аварийный, предусмотренный положениями СП 1.13130.2020[7].

Основные результаты расчетов и их обсуждение

В рамках анализа теплового воздействия пожара на балконе на окна лестничных клеток проведены расчеты полей температур газовой среды пожара на расстоянии 0,1 м от светопрозрачной части окна, а также тепловых потоков, которые падают на плоскость светопрозрачной части окна.

На основе анализа результатов этих расчетов для интервала времени от момента начала пожара до момента выхода на постоянное значение расчетных параметров определены максимальные значения температур t и тепловых потоков q в пределах каждого вертикального сечения, расположенного перпендикулярно плоскости окна на расстоянии L_1 от границы балкона и на этой основе построены графические зависимости, приведенные на рис. 2–7. На этих графиках значению скорости ветра $W = 2$ м/с соответствует температура воздуха $T_{вх} = 26$ °С, а скоростям ветра $W = 4$ м/с и $W = 6$ м/с — температура воздуха $T_{вх} = 25$ °С и $T_{вх} = 30$ °С соответственно.

[6] СП 131.13330.2020. СНиП 23-01–99*. Строительная климатология.

[7] СП 1.13130.2020. Системы противопожарной защиты. Эвакуационные пути и выходы.

В рамках первой серии расчетов анализировался пожар на балконе, который не распространяется в квартиру (дверь на балкон находится в закрытом положении). При этом рассмотрен как случай пожара на открытом балконе, так и случай пожара на частично открытом балконе с нижним негорючим ограждением (экраном), у которого зазор между ограждением и плитой перекрытия балкона составляет 100 мм. Результаты этих расчетов показаны на рис. 2, 3.

В рамках второй серии расчетов анализировался пожар, который происходит одновременно в квартире и на балконе (дверь на балкон находится в полностью открытом положении).

При этом рассмотрен как случай пожара на открытом балконе, так и случай пожара на частично открытом балконе с нижним негорючим ограждением (экраном), у которого зазор между ограждением и плитой перекрытия балкона составляет 100 мм. Результаты этих расчетов показаны на рис. 4–7.

При определении предельных значений t и тепловых потоков q, при которых не произойдет разрушения стеклопакета оконного остекления лестничных клеток, использованы данные натурных испытаний [17], согласно которым разрушение стеклопакета происходит через 5 мин воздействия на него со стороны фасада пламени с температурой 650 °С. С учетом данных о размере пламени, приведенных в [17], можно предположить, что его степень черноты составляла не менее ε = 0,6, а величина падающего

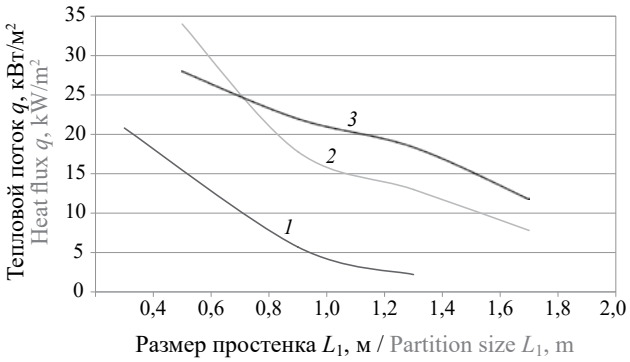


Рис. 2. Зависимость максимального теплового потока в зоне оконного проема от размера простенка при пожаре на открытом балконе жилого дома: *1* — при скорости ветра W = 2 м/с и его температуре; *2* — при скорости ветра W = 4 м/с; *3* — при скорости ветра W = 6 м/с

Fig. 2. Dependence of maximum heat flux in the zone of window opening on the size of partition in case of fire on the open balcony of a residential building: *1* — at wind speed W = 2 m/s; *2* — at wind speed W = 4 m/s; *3* — at wind speed W = 6 m/s

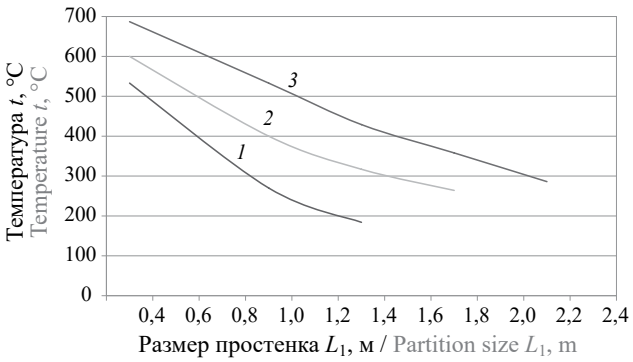


Рис. 3. Зависимость максимальной температуры в зоне оконного проема от размера простенка при пожаре на открытом балконе жилого дома: *1* — при скорости ветра W = 2 м/с; *2* — при скорости ветра W = 4 м/с; *3* — при скорости ветра W = 6 м/с

Fig. 3. Dependence of maximum temperature in the zone of window opening on the size of partition in case of fire on the open balcony of a residential building: *1* — at wind speed W = 2 m/s; *2* — at wind speed W = 4 m/s; *3* — at wind speed W = 6 m/s

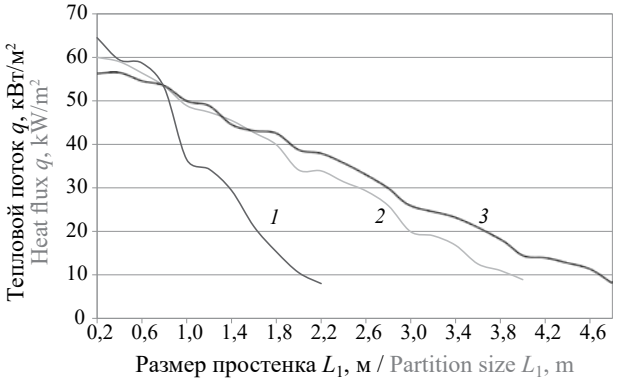


Рис. 4. Зависимость максимального теплового потока в зоне оконного проема от размера простенка при пожаре в квартире и на открытом балконе жилого дома: *1* — при скорости ветра W = 2 м/с; *2* — при скорости ветра W = 4 м/с; *3* — при скорости ветра W = 6 м/с

Fig. 4. Dependence of maximum heat flux in the zone of window opening on the size of partition in case of fire in an apartment and on an open balcony of a residential building: *1* — at wind speed W = 2 m/s; *2* — at wind speed W = 4 m/s; *3* — at wind speed W = 6 m/s

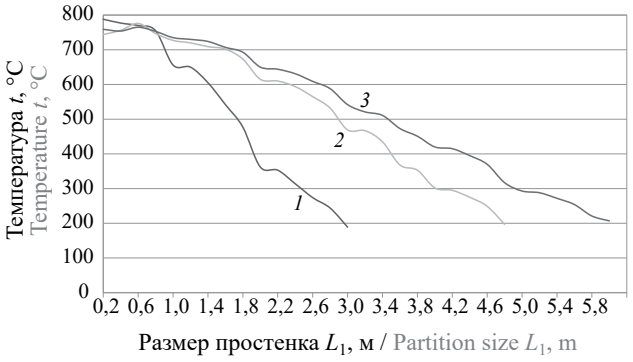


Рис. 5. Зависимость максимальной температуры в зоне оконного проема от размера простенка при пожаре в квартире и на открытом балконе жилого дома: *1* — при скорости ветра W = 2 м/с; *2* — при скорости ветра W = 4 м/с; *3* — при скорости ветра W = 6 м/с

Fig. 5. Dependence of maximum temperature in the zone of window opening on the size of partition in case of fire in an apartment and on an open balcony of a residential building: *1* — at wind speed W = 2 m/s; *2* — at wind speed W = 4 m/s; *3* — at wind speed W = 6 m/s

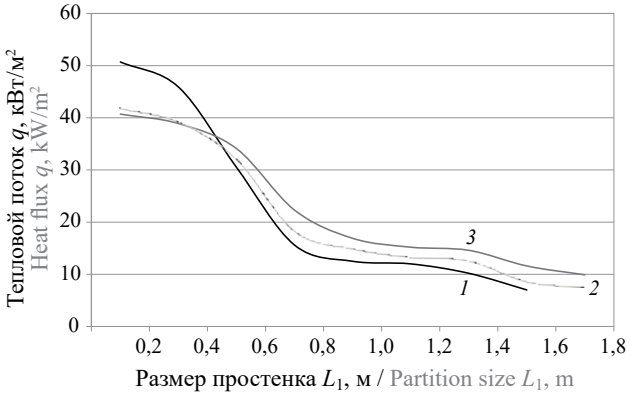


Рис. 6. Зависимость максимального теплового потока в зоне оконного проема от размера простенка при пожаре в квартире и на частично открытом балконе с нижним ограждением (экраном) жилого дома: *1* — при скорости ветра W = 2 м/с; *2* — при скорости ветра W = 4 м/с; *3* — при скорости ветра W = 6 м/с

Fig. 6. Dependence of maximum heat flux in the zone of window opening on the size of partition in case of fire in an apartment and on a partially-open balcony with a lower enclosure (screen) of a residential building: *1* — at wind speed W = 2 m/s; *2* — at wind speed W = 4 m/s; *3* — at wind speed W = 6 m/s

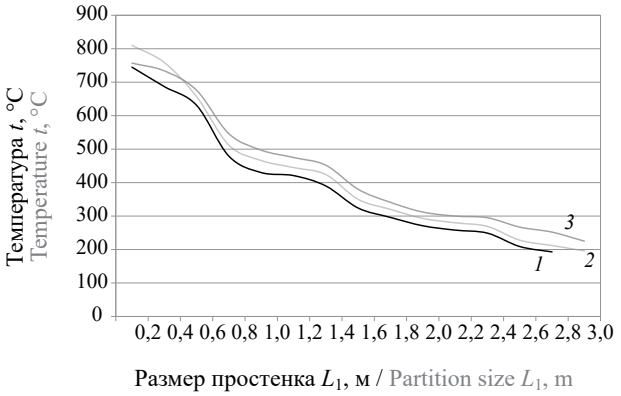


Рис. 7. Зависимость максимальной температуры в зоне оконного проема от размера простенка при пожаре в квартире и на частично открытом балконе с нижним ограждением (экраном) жилого дома: *1* — при скорости ветра W = 2 м/с; *2* — при скорости ветра W = 4 м/с; *3* — при скорости ветра W = 6 м/с

Fig. 7. Dependence of maximum temperature in the zone of window opening on the size of partition in case of fire in an apartment and on a partially-open balcony with a lower fence (screen) of a residential building: *1* — at wind speed W = 2 m/s; *2* — at wind speed W = 4 m/s; *3* — at wind speed W = 6 m/s

от пламени на поверхность окна теплового потока излучения была не менее q = 25 кВт/м^2.

Исходя из этого, а также с учетом результатов работ [18–20] и других исследований этих авторов, принято, что с необходимым для практики запасом по надежности в качестве предельно допустимых значений температуры и тепловых потоков, при которых не произойдет разрушение оконного остекления в виде стеклопакета при воздействии на него со стороны фасада пламени, следует принимать значения температуры $t_{пр}$ = 300 °С и падающего теплового потока $q_{пр}$ = 12,5 кВт/м^2.

Расчеты показали, что в случае открытого балкона фактор скорости ветра оказывает существенное влияние на размер простенка L_1, при котором значения температур и тепловых потоков не превышают предельно допустимых значений.

Так, при пожаре на открытом балконе значение теплового потока не будет превышать предельно допустимого значения $q_{пр}$ = 12,5 кВт/м^2 при величине простенка L_1 = 0,7 м, если скорость ветра равна W = 2 м/с, при величине простенка L_1 = 1,5 м, если скорость ветра равна W = 4 м/с и при величине простенка L_1 = 1,8 м, если скорость ветра равна W = 6 м/с (рис. 2).

А из рис. 3 видно, что при пожаре на открытом балконе значение температуры не будет превышать предельно допустимого значения $t_{пр}$ = 300 °С при величине простенка L_1 = 0,9 м, если скорость ветра равна W = 2 м/с, при величине простенка L_1 = 1,5 м, если скорость ветра равна W = 4 м/с и при величине простенка L_1 = 2,2 м, если скорость ветра равна W = 6 м/с.

Аналогичным образом при пожаре в квартире и на открытом балконе значение теплового потока не будет превышать предельно допустимого значения $q_{пр}$ = 12,5 кВт/м^2 при величине простенка L_1 = 1,9 м, если скорость ветра равна W = 2 м/с, при величине простенка L_1 = 3,6,м, если скорость ветра равна W = 4 м/с, при величине простенка L_1 = 4,5 м, если скорость ветра равна W = 6 м/с (рис. 4).

Одновременно из рис. 5 видно, что при пожаре в квартире и на открытом балконе значение температуры не будет превышать предельно допустимого значения $t_{пр}$ = 300 °С при величине простенка L_1 = 2,5 м, если скорость ветра равна W = 2 м/с, при величине простенка L_1 = 4,0 м, если скорость ветра равна W = 4 м/с, при величине простенка L_1 = 4,9 м, если скорость ветра равна W = 6 м/с.

Сравнение рис. 2 и 4, а также рис. 3 и 5 показывает, что при пожаре в квартире и на открытом балконе распространение опасных факторов пожара на фасаде здания имеет более интенсивный характер, чем при пожаре только в пределах балкона. Поскольку балконная дверь не нормируется по огнестойкости и не оборудуется устройством для самозакрывания, то при обосновании минимально необходимых размеров простенков необходимо анализировать пожар, который развивается как на балконе, так и в квартире. С учетом этого в данной статье сценарии пожара только в пределах балкона больше не анализировались.

Расчеты показывают, что наличие у балкона сплошного не светопрозрачного нижнего экрана из негорючих материалов (кирпич, бетон и т.д.) позволяет существенно уменьшить размер про-

стенка L_1, при котором значения температур и тепловых потоков не превышают предельно допустимых значений относительно соответствующих значений, полученных без ограждения.

Из сравнения рис. 4 и 6 видно, что размеры простенка L_1, при котором значения тепловых потоков не превышают предельно допустимых значений, в случае отсутствия ограждений при скорости ветра 2 м/с почти в 2 раза больше соответствующих значений, полученных при наличии ограждений, а при скорости ветра 6 м/с — более чем в 2,5 раза.

Аналогичным образом, сравнение рис. 5 и 7 показывает, что размеры простенка L_1, при котором значения температур не превышают предельно допустимые значений, в случае отсутствия ограждений при скорости ветра 2 м/с почти в 1,5 раза больше соответствующих значений, полученных при наличии ограждений, а при скорости ветра 6 м/с — более чем в 2 раза.

Апробация полученных результатов для обоснования требований к размерам простенков

Проведенные расчеты позволяют спрогнозировать тепловое воздействие пожара на светопрозрачное заполнение и не учитывают распространение ОФП внутрь объема лестничной клетки (как в случае разрушения остекления, так и в случае, когда створки окон при эксплуатации открыты). Эти данные получены для жилых зданий.

Поэтому данные результаты корректно можно распространять только на незадымляемые лестничные клетки типа Н2 жилых зданий, у которых остекленные проемы должны быть не с открывающимися окнами согласно[1].

Исходя из выбранных предельно допустимых значений температуры $t_{пр}$ = 300 °С и теплового потока $q_{пр}$ = 12,5 кВт/м^2 полученные результаты корректно можно распространять только на светопрозрачное заполнение окон из стеклопакетов.

Проведенные расчеты позволили установить, что минимально необходимые размеры простенка L_1, при котором значения температур и тепловых потоков не превышают предельно допустимых значений при пожаре в квартире и на открытом балконе, составляют:

- L_{1min} = 2,5 м, если скорость ветра равна W = 2 м/с (при температуре воздуха $T_{вх}$ = 26 °С);
- L_{1min} = 4,0 м, если скорость ветра равна W = 4 м/с (при температуре воздуха $T_{вх}$ = 25 °С);
- L_{1min} = 4,9 м, если скорость ветра равна W = 6 м/с (при температуре воздуха $T_{вх}$ = 30 °С).

А минимально необходимые размеры простенка L_1, при котором значения температур и тепловых потоков не превышают предельно допустимых значений при пожаре в квартире и на балконе с нижним ограждением, составляют:

- L_{1min} = 1,8 м, если скорость ветра равна W = 2 м/с (при температуре воздуха $T_{вх}$ = 26 °С);
- L_{1min} = 1,9 м, если скорость ветра равна W = 4 м/с (при температуре воздуха $T_{вх}$ = 25 °С);
- L_{1min} = 2,2 м, если скорость ветра равна W = 6 м/с (при температуре воздуха $T_{вх}$ = 30 °С).

В рамках апробации полученных результатов проанализирована корректность принятого в проекте размера простенка L_1 = 2,3 м между балконом жилого здания и окном незадымляемой лестничной клетки типа Н2 для г. Кашира (W = 4 м/с, $T_{вх}$ = 25 °С).

Балкон имеет нижнее ограждение в виде сплошного не светопрозрачного экрана из негорючих материалов и ленточное остекление, которое выполнено одинарным листовым флоат-стеклом. Светопрозрачная часть окна незадымляемой лестничной клетки типа Н2 предусмотрена из стеклопакета.

Балконное ленточное остекление с использованием одинарного листового флоат-стекла не обладает огнестойкостью и разрушится в начальной стадии пожара.

С учетом этого при данном конструктивном исполнении балкона минимально необходимый размер простенка L_{1min} следует принимать согласно расчетам, проведенным для случая пожара в квартире и на балконе с нижним ограждением. Поскольку данная величина составляет L_{1min} = 1,9 м, что меньше предусмотренной проектом величины L_1 = 2,3 м, то принятое проектное решение можно считать корректным.

В качестве второго примера проанализирована корректность принятого в проекте размера простенка L_1 = 3,5 м между балконом жилого здания и окном незадымляемой лестничной клетки типа Н2 для г. Симферополя (W = 6 м/с, $T_{вх}$ = 30 °С).

Балкон имеет панорамное остекление из закаленного стекла. Светопрозрачная часть окна незадымляемой лестничной клетки типа Н2 предусмотрена из стеклопакета.

Панорамное остекление из закаленного стекла не обладает огнестойкостью и разрушится в начальной стадии пожара.

При данном конструктивном исполнении балкона минимально необходимый размер простенка L_{1min} следует принимать согласно расчетам, проведенным для случая пожара в квартире и на открытом балконе. Поскольку данная величина составляет L_{1min} = 4,9 м, что больше предусмотренной проектом величины L_1 = 3,5 м, то принятое проектное решение нельзя считать корректным. В качестве дополнительного мероприятия в этом случае следует предусмотреть защиту оконного проема незадымляемой лестничной клетки типа Н2 противопожарным окном с пределом огнестойкости не менее Е30.

Заключение

Нормативные документы по пожарной безопасности регламентируют требования к размерам простенков между оконными проемами помещений и смежными оконными проемами лестничных клеток, позволяющие ограничить распространение опасных факторов пожара по плоскому фасаду здания из окон горящих помещений в оконные проемы лестничных клеток.

Однако нормативные документы не содержат требований к размеру простенков между балконами и окнами лестничных клеток с учетом конструктивных особенностей балконов, а также возможной скорости ветра в районе застройки.

Разработка этих требований обусловила необходимость анализа теплового воздействия пожара, возникшего на балконе, на оконное остекление лестничных клеток.

Проведенные расчеты позволили установить значения температур и тепловых потоков в зоне оконных проемов лестничных клеток при пожаре на балконе жилого здания в зависимости от конструктивного исполнения балконов, размеров простенков на плоском фасаде, а также возможной скорости ветра в районе застройки.

Расчеты базировались на базовых положениях методики определения пожарного риска в части использованной математической модели, а также рассмотрения сценариев пожара, при которых реализуются наихудшие условия для обеспечения безопасности людей.

На основе анализа результатов исследований поведения светопрозрачных конструкций при пожаре других авторов, в том числе полученных ими данных натурных испытаний, определены предельно допустимые значения температуры и тепловых потоков, при которых не произойдет разрушение оконного остекления в виде стеклопакета при воздействии на него пожара со стороны фасада.

Это позволило расчетным путем установить минимально необходимые размеры простенков, при которых значения температур и тепловых потоков не будут превышать предельно допустимых значений в зависимости от конструктивного исполнения балконов и возможной скорости ветра в районе застройки.

В рамках апробации полученных результатов проанализирована корректность ряда проектных решений по выбору размеров простенков между балконами различного конструктивного исполнения и окнами лестничных клеток жилых зданий, расположенных в отличных друг от друга климатических регионах.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. *Ярош А.С., Чалаташвили М.Н., Кроль А.Н., Попова Е.А., Романова В.В., Сачков А.В.* Анализ математических моделей развития опасных факторов пожара в системе зданий и сооружений // Вестник научного центра по безопасности работ в угольной промышленности. 2019. № 1. С. 50–56. EDN TUFIDN.
2. *Дроздов Д.С., Дроздова Т.И.* Графическое моделирование для оценки опасных факторов пожара // Техногенная и природная безопасность : сб. науч. тр. V Междунар. науч.-практ. конф. Саратов, 24–26 апреля 2019 г. / под ред. С.М. Рогачевой, А.С. Жутова, И.М. Учаевой. Саратов : Амирит, 2019. С. 69–73.
3. *Бедрина Е.А., Рекин А.С., Храпский С.Ф., Бокарев. А. И., Денисова Е.С.* 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. EDN LTPRRL.
4. *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
5. *McGrattan K., Miles S.* Modeling fires using Computational Fluid Dynamics (CFD). SFPE Handbook of Fire Protection Engineering. Chapter 32. Fifth Edition. Society of Fire Protection Engineers, 2016. Pp. 1034–1065. DOI: 10.1007/978-1-4939-2565-0
6. *Недрышкин О.В., Гравит М.В.* Программные комплексы моделирования опасных факторов пожара // Пожарная безопасность. 2018. № 2. С. 38–46. EDN XQNGLB.
7. *Кошмаров Ю.А.* Прогнозирование опасных факторов пожара в помещении : учеб. пособие. М. : Академия ГПС МВД России, 2000. 118 с.
8. *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.
9. *Cortés D., Gil D., Azorín J., Vandecasteele F., Verstockt S.* A review of modelling and simulation methods for flashover prediction in confined space fires. Applied Sciences (Switzerland), 2020. No. 10 (1). Pp. 1–18. DOI: 10.3390/app10165609
10. *Zhang T., Wang Z., Wong H., Tam W., Huang X., Xiao F.* Real-time forecast of compartment fire and flashover based on deep learning // Fire Safety Journal. 2022. No. 130. P. 103579. DOI: 10.1016/j.firesaf.2022.103579 URL: https://tsapps.nist.gov/publication/get_pdf.cfmpub_id=933297

11. *Wang J., Tam W.C., Jia Y., Peacock R., Reneke P., Fu E.Y. et al.* P-Flash A machine learning-based model for flashover prediction using recovered temperature data // Fire Safety Journal. 2021. No. 122. P. 103341. DOI: 10.1016/j.firesaf.2021.103341
12. *Launder B.E., Spalding D.B*. The numerical computation of turbulent flows // Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering. 1974. No. 3 (2). Pp. 269–289. DOI: 10.1016/0045-7825(74)90029-2
13. *Hossain M.S., Rodi W.* A turbulence model for buoyant flows and its application for vertical buoyant jets // Turbulent Buoyant Jets and Plums (Rodi W. ed.). HMT Series : Oxford, England, 1982. Vol. 6. Pp. 121–172.
14. *Lockwood F.C., Shah N.G.* A new radiation solution method for incorporation in general combustion prediction procedures // Proceedings of the Simposium (International) on Combustion. 1981. No. 18 (1). Pp. 1405–1414. DOI: 10.1016/S0082-0784(81)80144-0
15. *Bressloff N.W., Moss J.B., Rubini P.A.* Assessment of a differential total absorptivity solution to the radiative transfer equation as applied in the discrete transfer radiation model. Numerical heat transfer, Part B // An International Journal of Computation and Methodology. 1996. No. 29 (3). Pp. 381–397. DOI: 10.1080/10407799608914988
16. *Truelove J.S.* The two-flux model for radiative transfer with strongly anisotropic scattering // International Journal of Heat and Mass Transfer. 1984. No. 27 (3). Pp. 464–466. DOI: 10.1016/0017-9310(84)90294-1
17. *Безбородов В.И.* Устойчивость при пожаре фасадных светопрозрачных конструкций высотных жилых зданий : дис. … канд. техн. наук. М., 2019. 161 с.
18. *Зубкова Е.В., Казиев М.М.* Поведение при пожаре и огнезащита светопрозрачных строительных конструкций // Вестник ВНИИНМАШ. 2014. № 1 (16). С. 54–55.
19. *Дудунов А.В.* Пожароустойчивость светопрозрачного заполнения оконных строительных конструкций : дис. … канд. техн. наук. М., 2010. 128 с.
20. *Зубкова Е.В.* Факторы разрушения листового стекла при пожаре // Технологии техносферной безопасности : интернет-журнал. 2015. № 4 (62). URL: http://academygps.ucoz.ru/ttb/2015-4/2015-4.html

REFERENCES

1. Yarosh A.S., Chalatashvili M.N., Krol A.N., Popova E.A., Romanova V.V., Sachkov A.V. Analysis of mathematical models for the development of dangerous fire factors in the system of buildings and structures. *Bulletin of the scientific center for the safety of work in the coal industry.* 2019; 1:50-56. EDN TUFIDN. (rus).
2. Drozdov D.S., Drozdova T.I. Graphic modeling for assessing fire hazards. *Technogenic and natural safety* : *collection of scientific papers of the 5th international scientific and practical conference. Saratov, April 24–26, 2019* / ed. C.M. Rogacheva, A.S. Zhutova, I.M. Uchaeva. Saratov, Amirit, 2019; 69-73. (rus).
3. Bedrina E.A., Rekin A.S., Khrapsky S.F., Bokarev A.I., Denisova E.S. Forecasting the dynamics of heat and mass transfer processes during fires in typical multi-storey residential buildings. *Dynamics of systems, mechanisms and machines*. 2019; 7(3):10-15. DOI: 10.25206/2310-9793-7-3-10-15. EDN LTPRRL. (rus).
4. Khrapsky S.F., Bedrina E.A. Dynamics of development of heat and mass transfer processes during fires in residential multi-apartment buildings and its influence on the possibility of safe evacuation of people. *Dynamics of systems, mechanisms and machines.* 2020; 8(3):124-131. DOI: 10.25206/2310-9793-8-3-124-131 (rus).
5. McGrattan K., Miles S. Modeling fires using Computational Fluid Dynamics (CFD). *SFPE Handbook of Fire Protection Engineering*. *Chapter 32. Fifth Edition.* Society of Fire Protection Engineers, 2016; 1034-1065. DOI: 10.1007/978-1-4939-2565-0
6. Nedryshkin O.V., Gravit M.V. Software systems for modeling fire hazards. *Fire safety*. 2018; 2:38-46. EDN XQNGLB. (rus).
7. Koshmarov Yu.A. *Prediction of dangerous factors of fire in premises : textbook allowance.* Moscow, Academy of State Fire Service of the Ministry of Internal Affairs of Russia, 2000; 118. (rus).
8. Puzach S.V. *Methods for calculating heat and mass transfer during a fire in a room and their application in solving practical problems of fire and explosion safety.* Moscow, Academy of State Fire Service of the Ministry of Emergency Situations of Russia, 2005; 336. (rus).
9. Cortés D., Gil D., Azorín J., Vandecasteele F., Verstockt S. *A review of modelling and simulation methods for flashover prediction in confined space fires*. Applied Sciences (Switzerland), 2020; 10(1):1-18. DOI: 10.3390/app10165609
10. Zhang T., Wang Z., Wong H., Tam W., Huang X., Xiao F. Real-time forecast of compartment fire and flashover based on deep learning. *Fire Safety Journal.* 2022; 130:103579. DOI: 10.1016/j.firesaf.2022.103579 URL: https://tsapps.nist.gov/publication/get_pdf.cfmpub_id=933297
11. Wang J., Tam W.C., Jia Y., Peacock R., Reneke P., Fu E.Y. et al. P-Flash a machine learning-based model for flashover prediction using recovered temperature data. *Fire Safety Journal*. 2021; 122:03341. DOI: 10.1016/j.firesaf.2021.103341
12. Launder B.E., Spalding D.B. The numerical computation of turbulent flows. *Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering*. 1974; 3(2):269-289. DOI: 10.1016/0045-7825(74)90029-2
13. Hossain M.S., Rodi W.A. Turbulence model for buoyant flows and its application for vertical Buoyant jets. *Turbulent Buoyant Jets and Plums* (Rodi W. ed.). HMT Series, Oxford, England, 1982; 6:121-172.

14. Lockwood F.C., Shah N.G. A new radiation solution method for incorporation in general combustion prediction procedures. *Proceedings of the Simposium (International) on Combustion.* 1981; 18(1):1405-1414. DOI: 10.1016/S0082-0784(81)80144-0
15. Bressloff N.W., Moss J.B., Rubini P.A. Assessment of a differential total absorptivity solution to the radiative transfer equation as applied in the discrete transfer radiation model. Numerical heat transfer, Part B. *An International Journal of Computation and Methodology*. 1996; 29(3):381-397. DOI: 10.1080/10407799608914988
16. Truelove J.S. The two-flux model for radiative transfer with strongly anisotropic scattering. *International Journal of Heat and Mass Transfer.* 1984; 27(3):464-466. DOI: 10.1016/0017-9310(84)90294-1
17. Bezborodov V.I. *Fire stability of the facade translucent structures of high-rise residential buildings : dissertation of Candidate of technical sciences*. Moscow, 2019; 161. (rus).
18. Zubkova E.V., Kaziyev M.M. Behavior in fire and fire protection of translucent building structures. *Bulletin of VNIINMASH*. 2014; 1(16):54-55. (rus).
19. Dudunov A.V. *Fire resistance of translucent filling of window building structures : dissertation of Candidate of technical sciences.* Moscow, 2010; 128. (rus).
20. Zubkova E.V. Factors of destruction of glass sheets during fire. *Technologies of technosphere safety : online magazine.* 2015; 4(62). URL: http://academygps.ucoz.ru/ttb/2015-4/2015-4.html (rus).

Поступила 03.04.2024, после доработки 07.09.2024;
принята к публикации 23.09.2024
Received April 3, 2024; Received in revised form September 7, 2024;
Accepted September 23, 2024

Информация об авторах

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

ЛУЧКИН Сергей Алексеевич, научный сотрудник отдела огнестойкости строительных конструкций и инженерного оборудования, Всероссийский ордена «Знак Почета» научно-исследовательский институт противопожарной обороны Министерства Российской Федерации по делам гражданской обороны, чрезвычайным ситуациям и ликвидации последствий стихийных бедствий, Россия, 143903, Московская обл., г. Балашиха, мкр. ВНИИПО, 12; ORCID: 0000-0003-2313-6309; e-mail: Luchkin.sergey@yandex.ru

ГОМОЗОВ Александр Васильевич, к.т.н., ведущий научный сотрудник отдела огнестойкости строительных конструкций и инженерного оборудования, Всероссийский ордена «Знак Почета» научно-исследовательский институт противопожарной обороны Министерства Российской Федерации по делам гражданской обороны, чрезвычайным ситуациям и ликвидации последствий стихийных бедствий, Россия, 143903, Московская обл., г. Балашиха, мкр. ВНИИПО, 12; ORCID: 0000-0001-9660-9221; e-mail: Gomozovav@yandex.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, the Honored Scientist of the Russian Federation, Head of Thermal Physics and Hydraulic Department, the State Fire Academy of the Ministry of Russian Federation for Civil Defense, Emergencies and Elimination on Consequences of Natural Disasters, Borisa Galushkina St., 4, Moscow, 129366, Russian Federation; ORCID: 0000-0001-7234-1339; e-mail: puzachsv@mail.ru

Sergey A. LUCHKIN, Researcher, Department of Fire Resistance of Building Structures and Engineering Equipment, All-Russian Research Institute for Fire Protection of Ministry of Russian Federation for Civil Defense, Emergencies and Elimination of Consequences of Natural Disasters, VNIIPO, 12, Balashikha, Moscow Region, 143903, Russian Federation; ORCID: 0000-0003-2313-6309; e-mail: Luchkin.sergey@yandex.ru

Alexander V. GOMOZOV, Candidate of Technical Sciences, Leading Researcher of the Department of Fire Resistance of Building Structures and Engineering Equipment, All-Russian Research Institute for Fire Protection of Ministry of Russian Federation for Civil Defense, Emergencies and Elimination of Consequences of Natural Disasters, VNIIPO, 12, Balashikha, Moscow Region, 143903, Russian Federation; ORCID: 0000-0001-9660-9221; e-mail: Gomozovav@yandex.ru

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

ПОЖАРОВЗРЫВОБЕЗОПАСНОСТЬ/FIRE AND EXPLOSION SAFETY. 2024. Т. 33. № 5. С. 26–50
POZHAROVZRYVOBEZOPASNOST/FIRE AND EXPLOSION SAFETY. 2024; 33(5):26-50

ОБЗОРНО-АНАЛИТИЧЕСКАЯ СТАТЬЯ/REVIEW AND ANALYTICAL ARTICLE

УДК 614.841.343

https://doi.org/10.22227/0869-7493.2024.33.05.26-50

Применение легкосбрасываемых сэндвич-панелей для защиты производственных зданий в условиях арктического климата

Евгений Степанович Рассказов[1]✉, Дмитрий Александрович Корольченко[2]

[1] Песко Энергия и Ресурсы АО, г. Москва, Россия

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

АННОТАЦИЯ

Предмет исследования. Усовершенствование защиты и разработка инновационного решения с применением легкосбрасываемых конструкций из сэндвич-панелей для защиты зданий от внутренних аварийных взрывов в условиях климатического пояса Арктической зоны.

В результате исследования установлено влияние разницы температур окружающей среды снаружи здания/сооружения (от –40 °С и ниже) и внутри здания/сооружения (от +18 °С и выше) на состояние легкосбрасываемых конструкций в местах установки разрушаемых узлов крепления (РУК), а именно: выявлено образование наледи и конденсата в местах стыковочных соединениях ЛСК, а также РУК, что негативно влияет на эффективность работоспособности системы защиты здания от внутренних аварийных взрывов.

Цель. Повышение взрывоустойчивости зданий/сооружений с применением легкосбрасываемых конструкций (ЛСК) из сэндвич-панелей с учетом климатических воздействий Арктической зоны в случае образования внутреннего избыточного давления.

Задачи:

- анализ производства и применения сэндвич-панелей как легкосбрасываемых конструкций в России и за рубежом;
- анализ литературных и патентных источников существующих ЛСК, применяемых в Арктической зоне;
- анализ влияния экстремально низких температур на работу ЛСК, в частности на работу РУК;
- синтезирование объектов исследования.

Аналитическая часть. Развернутое представление результатов исследования (анализа).

Выводы. Обоснована ценность полученных результатов и предложены рекомендации по их использованию. Применяемые в настоящее время ЛСК доказали свою эффективность в климатических условиях, не относящихся к Арктической зоне, однако для применения в экстремальных климатических условиях Арктики требуется дальнейшая адаптация и усовершенствование данных ЛСК.

Ключевые слова: стеновой блок; предохранительные конструкции; экстремально низкая температура; обледенение; эвакуационный выход; тушение пожара; неблагоприятные погодные условия; аварийная эвакуационная точка; аварийный проем

Для цитирования: *Рассказов Е.С., Корольченко Д.А.* Применение легкосбрасываемых сэндвич-панелей для защиты производственных зданий в условиях арктического климата // Пожаровзрывобезопасность/Fire and Explosion Safety. 2024. Т. 33. № 5. С. 26–50. DOI: 10.22227/0869-7493.2024.33.05.26-50

✉ *Рассказов Евгений Степанович,* e-mail: evgenyples@hotmail.com

Application of lightweight removable sandwich panels for protection of industrial buildings in Arctic climate conditions

Evgenii S. Rasskazov[1]✉, Dmitriy A. Korolchenko[2]

[1] JSC “PESCO Energy & Resources”, Moscow, Russian Federation

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

ABSTRACT

Introduction. Improvement of protection and development of an innovative solution using lightweight removable panels made of sandwich panels to protect buildings from internal emergency explosions in the climatic zone of the Arctic region was carried out.

 © Е.С. Рассказов, Д.А. Корольченко, 2024

As a result of the research, the influence of the temperature difference between the external environment (from –40 °C and below) and the interior of the building/structure (from +18 °C and above) on the condition of lightweight removable panels at the installation points of destructible frame fastening unit (DFFU) was established. Specifically, ice formation and condensation were identified at the joints of the lightweight removable panels (LRP), as well as inside the DFFU, which negatively affects the efficiency and performance of the building protection system against internal emergency explosions.

Aim. To enhance the explosion resistance of buildings/structures through the use of lightweight removable panels made of sandwich panels, considering the climatic impacts of the Arctic region in case of internal overpressure formation.

Objectives:

- analysis of the production and application of sandwich panels as lightweight removable structures in Russia and abroad;
- review of literature and patent sources on existing LRP used in the Arctic region;
- analysis of the impact of extremely low temperatures on the performance of LRP, particularly on the functionality of the DFFU;
- synthesis of research objects.

Analytical Section. A detailed presentation of the research results (analysis).

Conclusions. The value of the obtained results is substantiated, and recommendations for their implementation are provided. The lightweight removable panels (LRP) currently in use have proved their efficiency in climatic conditions outside the Arctic zone; however, further adaptation and improvement of these LRP are required for application in the extreme climatic conditions of the Arctic.

Keywords: wall block; protective structures; extremely low temperature, icing; emergency exit; fire suppression; adverse weather conditions; emergency opening; emergency aperture

For citation: Rasskazov E.S., Korolchenko D.A. Application of lightweight removable sandwich panels for protection of industrial buildings in Arctic climate conditions. *Pozharovzryvobezopasnost/Fire and Explosion Safety*. 2024; 33(5):26-50. DOI: 10.22227/0869-7493.2024.33.05.26-50 (rus).

✉ *Evgenii Stepanovich Rasskazov*, e-mail: evgenyples@hotmail.com

ВВЕДЕНИЕ

Узкоспециализированная область исследования легкосбрасываемых конструкций (ЛСК) является одной из важных областей в строительстве опасных производственных объектов (ОПО), что включает в себя разработку новых материалов, методов монтажа/демонтажа, связанных с защитой здания. Под защитой подразумевается способность здания противостоять разрушениям при образовании избыточного давления внутри здания, а также выдерживать воздействие экстремально низкой температуры внешней окружающей среды, включая разницу внешней и внутренней температуры. Исследования теплотехнических характеристик здания и их важности во всех аспектах проводились многими исследователями, для примера выделим работу [1], где авторы предлагают решения сложных задач по тепловому комфорту гражданских зданий, а именно устранение жары и влажности, приводят пример неэффективных практик по формированию защиты здания от влияния температур и влаги.

Экстремальные климатические условия Арктической зоны оказывают негативное влияние на работоспособность защиты здания, в частности на ЛСК. Так, в стыковочных местах разрушаемых узлов крепления (РУК) при наружной температуре –40 °С (и ниже) и внутренней температуре +18 °С (и выше) происходит промерзание и образование на поверхности наледи/конденсата, что делает механизм РУК малоэффективным и при длительном воздействии приведет его к повреждению.

Исследования применения сэндвич-панелей в качестве ЛСК в современном строительстве зданий опасного производственного объекта (ОПО) дают возможность поиска и разработки инновационных решений по защите зданий/сооружений, которые позволят строить и эксплуатировать производственные здания/сооружения с высокой категорией взрывопожарной и пожарной опасности более эффективно, безопасно и экономически выгодно.

АНАЛИТИЧЕСКАЯ ЧАСТЬ

Вводная часть

Созданные в 1930 г. в США сэндвич-панели получили широкую популярность в мире для строительства жилья, а со временем их стали применять в строительстве производственных объектов [2]. Так, в 80-х годах в СССР запустили первые производственные объекты из сэндвич-панелей собственного производства [3].

На сегодняшний день в строительстве производственных зданий любых размеров существует значительное количество разного типа стеновых сэндвич-панелей с характеристиками теплозащиты и ЛСК, которые также применяются разными странами при эксплуатации промышленных предприятий; и прогноз показывает, что применение сэндвич-панелей с полимерным наполнителем в производстве будет расти с каждым годом, продажа сэндвич-

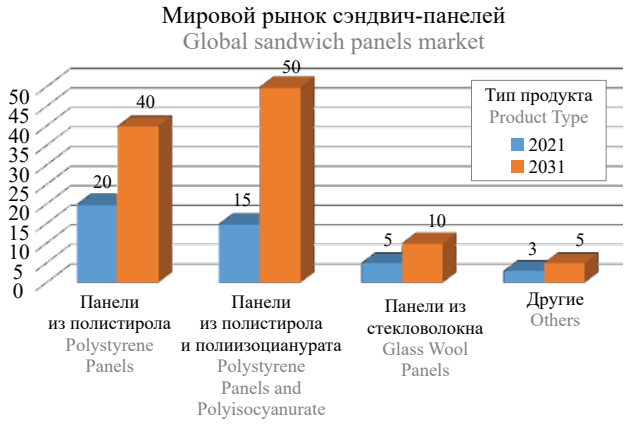


Рис. 1. Сегмент полистирольных панелей принес наибольший доход рынку в 2021 г.
Fig. 1. The polystyrene panels segment brought the highest revenue to the market in 2021

панелей в 2021 г. показала высокий рост (рис. 1), а к 2030 г. продажа вырастет в два раза, что делает сэндвич-панели самым популярным строительным материалом производственных зданий и сооружений [4].

География применения сэндвич-панелей обширна, ведь производственные объекты находятся в разных климатических поясах Земли, включая полярный/субполярный пояса, а границы полярного и субполярного поясов можно увидеть на схематической карте климатических поясов Земли [5]. И в таких регионах, как правило, сэндвич-панели используются для наружной обшивки стены здания/сооружения, либо в качестве стеновой панели здания/сооружения из легких металлических конструкций (ЛМК).

Применение стеновых сэндвич-панелей в народном хозяйстве нашей страны для защиты установок/оборудования от экстремально низких температур и снежных буранов облегчило организациям, эксплуатирующим эти объекты, осуществление обслуживания технологического оборудования, находящегося внутри здания, при этом защищая персонал от холода и риска обморожения.

Но наряду с защитными характеристиками здания/сооружения имеется риск образования газопаровоздушной смеси (ГПВС) внутри здания в результате аварийного пролива горючей жидкости или аварийной утечки горючих газов из газопровода или технологического оборудования, так как стеновые панели из сэндвич-панелей имеют хорошую герметичность и практически отсутствие воздушных потоков, что может привести к взрыву с последующим разрушением здания, повреждением технологического оборудования и гибели людей. Поэтому еще на этапе строительства здания закладываются системы защиты, включая вентиляцию, пожаротушение и пожарную сигнализацию, а при эксплуатации данные системы вводят в эксплуатацию и поддерживаются в рабочем исправном состоянии.

В работе регионом исследования приняли считать территории континентальной части Арктической зоны (Арктики) Российской Федерации, установленные согласно Указу[1] (рис. 2).

На сегодняшний день в строительстве быстровозводимых сооружений и зданий применяются легкие металлоконструкции (ЛМК), в работе [6] изложен подход для строительства быстровозводимых сооружений из ЛМК с применением специальных программ проектирования зданий из ЛМК. Как показала практика масштаба применения ЛМК, то подобные конструкции подходят для защиты уникального высокотехнологичного оборудования и установок от экстремально низких температур окружающей среды. Основными несущими элементами сооружений из ЛМК являются стальной прокатный профиль, как правило двутавровый, а в качестве конструктивных элементов применяются: балки, фермы, колонны, стойки и т.д.

Стеновые сэндвич-панели пока не являются несущим конструктивным элементом здания, их используют только для стеновой обшивки здания из ЛМК, но в настоящее время проводятся исследования со стеновыми сэндвич-панелями, которые отражены в работах [7], введено понятие «*силовая сэндвич-панель поэлементной сборки*»; исследователи продолжают дальнейшее изучение поиска новых решений, придания стеновым панелям жесткости, сравнимой с бетонными изделиями. Также имеются некоторые достижения исследований в области придания жесткости сэндвич-панелям: так исследователи [8] доказали, что нагрузка на линейный угловой прогиб из сэндвич-панели может выдерживать значительно большую нагрузку, учитывая небольшой размер конструкции (рис. 3).

Сооружения/здания из ЛМК, обшитые стеновыми сэндвич-панелями, применяются не только в России, но и в зарубежных странах, расположенных как в южных широтах, так и в северных широтах областей Земли с повышенной сейсмической опасностью, авторы [9] исследовали влияние боковой жесткости колонн и сэндвич-панелей при горизонтальных нагрузках, а именно на сейсмостойкость конструкции в полной сборке, таким образом подтверждая, что стеновые панели из сэндвич-панелей в сборке с железобетонными конструкциями представляют собой конструкцию, способную перераспределять сейсмические силы. Исследователями [10] проведены испытания сэндвич-панелей с бетонным наполнителем из материала, имеющего эффективное термиче-

[1] О сухопутных территориях Арктической зоны Российской Федерации : Указ Президента Российской Федерации от 02.05.2014 № 296.

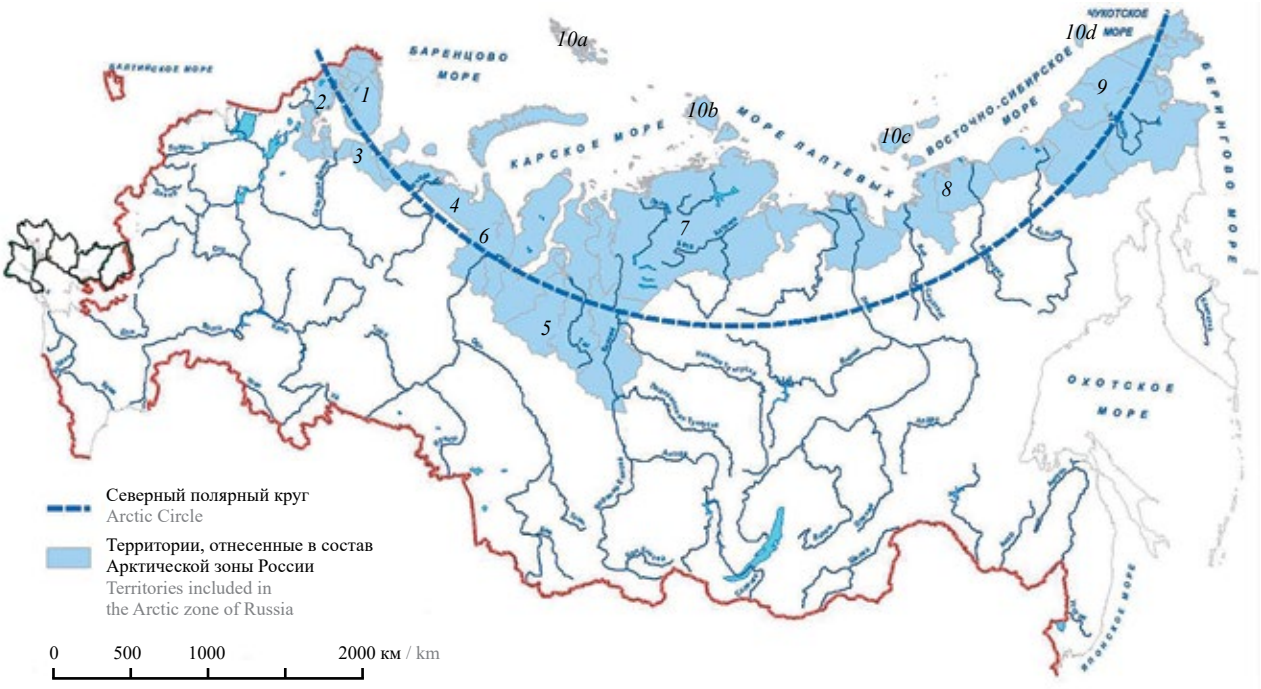


Рис. 2. Арктическая зона Российской Федерации. Регионы: *1* — Мурманская область; *2* — Республика Карелия; *3* — Архангельская область; *4* — Ненецкий автономный округ; *5* — Ямало-Ненецкий автономный округ; *6* — Республика Коми; *7* — Красноярский край; *8* — Республика Саха (Якутия); *9* — Чукотский автономный округ; *10* — земли и острова, расположенные в Северном Ледовитом океане: *10a* — Земля Франца-Иосифа; *10b* — Северная Земля; *10c* — Новосибирские острова; *10d* — остров Врангеля

Fig. 2. Arctic zone of the Russian Federation. Regions: *1* — Murmansk region; *2* — Republic of Karelia; *3* — Arkhangelsk region; *4* — Nenets Autonomous District; *5* — Yamalo-Nenets Autonomous District; *6* — Komi Republic; *7* — Krasnoyarsk Region; *8* — Sakha Republic (Yakutia); *9* — Chukotka Autonomous District; *10* — lands and islands located in the Arctic Ocean: *10a* — Franz Josef Land; *10b* — Severnaya Zemlya; *10c* — The New Siberian Islands; *10d* — Wrangel Island

ское сопротивление внешней окружающей среды, они представили обзор пяти наиболее распространенных в мире сборных стеновых панелей: легкие деревянные каркасные панели (LTF), легкие металлические каркасные панели (LSF), структурно-изолированные панели (SIP), панели из поперечно-клееной древесины (CLT) и сборные бетонные сэндвич-панели (PCSP). Данные исследования показали практическое применение сэндвич-панелей как материала для возведения зданий.

Предложение обработать поверхности металла конструкций здания/сооружения для защиты от

Рис. 3. Угловой прогиб из сэндвич-панели под нагрузкой [8]
Fig. 3. Angular deflection of a sandwich panel under load [8]

негативного воздействия окружающей среды в виде осадков (коррозии), а также об дополнительном эффекте теплопроводности отражено в работе [11]; например, использование подложки с PVD-покрытием, которая имеет тонкую пленку с заметной коррозионной/износостойкостью, большей толщины, поможет увеличить срок службы защищаемого изделия. Подобные исследования продолжаются, поэтому ожидаем результаты.

Также исследования в области звукоизоляции/шумоизоляции с применением сэндвич-панелей с сердечником из минеральной ваты показали лучшие положительные результаты [12], при этом улучшение звукоизоляции сэндвич-панелей обеспечивается без существенного увеличения их массы и толщины.

Как ранее было сказано, оптимальным решением защиты от воздействия экстремально низкой температуры является простое и надежное решение: применение стеновых сэндвич-панелей с соответствующими теплофизическими характеристиками. Для наглядности картины влияния неблагоприятных погодных условий представлен рис. 4, где показан производственный объект, подвергшийся снежному намету и обледенению. Подобные ситуации наблюдаются повсюду: как на гражданских, так и на производствен-

Рис. 4. Фото производственного объекта в Арктике. Снежные наметы на крыше, стенах, окнах
Fig. 4. Photo of a production facility in the Arctic. Snowdrifts on the roof, walls, windows

ных объектах, расположенных в регионах Арктической зоны, особенно в холодный период года.

Применение сэндвич-панелей в народном хозяйстве

По итогам геологоразведки в Арктике, а именно в Ямало-Ненецком автономном округе, Республике Саха (Якутия), Республике Коми имеются гигантские нефтегазоконденсатные месторождения, на которых ведется интенсивное строительство заводов по добыче газа и нефти, сжижение природного газа крупными переработчиками (лицензиатами), такими как АО «Газпром», ПАО «НК «Роснефть», ПАО «Новатэк» и т.п. В целом в России успешно функционируют тридцать газоперерабатывающих заводов и большое количество газохимических комбинатов. В работе [13] отражены исследования и найдено подтверждение тому, что от лицензиатов требуется качественный подход к обеспечению высокого уровня безопасности на всех этапах реализации проектов нефтегазового сектора производства, потому что разведка, строительство и эксплуатация таких объектов должны сопровождаться максимальной безопасностью для людей и экологии, а следовательно, имеют приоритетную основу. Обеспечение безопасности должно быть не только от холода и других опасных и вредных факторов неблагоприятных погодных условий, но также от аварийного взрыва и его последствий.

Перспективы развития нефти, газа, газового конденсата в Артике также находят подтверждение в работе [14], в которой предлагается применять исследования компаниям и аналитикам нефтегазового сектора, заинтересованным в консолидированной информации о перспективах реализации нефтегазовых проектов в Арктике. На рис. 5 показаны основные места добычи нефти, газа и конденсата Ямало-Ненецкого автономного округа.

Для успешной добычи нефти и газа или нефтегазового конденсата еще на этапе строительства возникает потребность в обеспечении защиты здания/оборудования и людей от возможного последствия пролива/утечки легковоспламеняющейся жидкости (ЛВЖ) и горючих газов (ГГ) в здании. В Российской Федерации имеются определенные правила и требования по защите производственных зданий/сооружений от аварийных локальных взрывов внутри помещений.

Требования СП 56.13330.2021[2] обязывают лицензиата на этапе проектирования ОПО принять архитектурно-конструктивные решения и предусмотреть мероприятия, направленные на обеспечение безопасности людей, экологии, защиту здания/сооружения при дальнейшей эксплуатации, а сами требования к данным мероприятиям изложены в СП 12.13130.2009[3]. Следует отметить, что не стало исключением и обеспечение безопасности производственной деятельности на ОПО в Арктической зоне России.

Расположенные на ОПО по подготовке нефти/газа производства химической продукции из углеводородов производственные здания и сооружения относятся к категории взрывоопасности А или Б. Данная категория присваивается в соответствии с требованиями Федерального закона[4], а критерием определения категории А или Б является температура вспышки ЛВЖ и ГГ; таким образом, категория А объекту присваивается при температуре вспышки +28 °С и менее, категория Б — +28 °С и более. При этом объекты категории А или Б должны иметь вероятность образования избыточного давления (ΔP) или аварийного взрыва в помещении величиной ≥ 5 кПа (см. п. 5.1, табл. 1, СП 12.13130.2009[5]); соответственно, данное производство по характеру производственного процесса относится к взрывопожароопасному оборудованию и в случае аварийного пролива/утечки ЛВЖ или ГГ возникает высокая вероятность аварийного взрыва. Так, в п. 6.2.30, СП[2] при категориях помещений А или Б следует предусматривать ЛСК. Площадь ЛСК при отсутствии расчетных данных должна составлять не менее 0,05 м^2 на 1 м^3 объема помещения категории А и не менее 0,03 м^2 — помещения категории Б.

При учете нормативно-технических требований СП[2] лицензиатом при строительстве сооружений

[2] СП 56.13330.2021. Производственные здания.

[3] СП 12.13130.2009. Определение категорий помещений, зданий и наружных установок по взрывопожарной и пожарной опасности.

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

[5] СП 12.13130.2009. Определение категорий помещений, зданий и наружных установок по взрывопожарной и пожарной опасности.

Рис. 5. Места разработки крупных месторождений нефти и газа Ямало-Ненецкого автономного округа: *1* — завод Ямал СПГ Саус-Тамбейское месторождение (Новатэк – ЯНАО); *2* — ГПС Бованенковское и Харасавэйское НГК месторождения (Газпромнефть – ЯНАО); *3* — Ямбургское НГК месторождение АО «Газпром-добыча Ямбург»; *4* — Западно-Таркосалинского и Ен-Яхинского НГК месторождение (Газпромнефть – ЯНАО); *5* — Уренгойское НГК месторождение (Газпромнефть – ЯНАО)

Fig. 5. Oil and gas development sites in the Yamalo-Nenets Autonomous District: *1* — Yamal LNG Plant South Tambeystkoye field (Novatek – YNAD); *2* — SFS Bovanenkovskoye and Kharasaveyskoye OGC fields (Gazprom Neft – YNAD); *3* — Yamburgskoye OGC field of JSC "Gazprom dobycha Yamburg"; *4* — Zapadno-Tarkosalinskoye and Yen-Yakhinskoye OGC fields (Gazprom Neft – YNAD); *5* — Urengoyskoye OGC field (Gazprom Neft – YNAD)

ОПО ожидается, что ЛСК вскроют проем для сброса давления уже на уровне образования ΔP до 5 кПа и при этом обеспечат защиту несущих металлоконструкций здания, оборудования/установок от последствий аварийного взрыва.

Учитывая величину материального ущерба от последствий аварийного взрыва, появляется устойчивое подтверждение экономической эффективности применения ЛСК в качестве ограждающих конструкций зданий ОПО, что подтверждается в работах [15], с тем условием, что лицензиат учтет не только прямой, но и косвенный ущерб от аварии.

Конструктивные особенности стеновых сэндвич-панелей и ЛСК

Здания и сооружения, возводимые в Арктической зоне, имеют высокий коэффициент теплоизоляционных свойств, которые формируют принцип среды обитания в Арктическом регионе [16]. Важной чертой современных стеновых сэндвич-панелей являются высокие теплоизоляционные свойства, а также способность выдерживать обильные снегопады, ледяные бури и сильные ветра, так как конструкция сэндвич-панели представляет собой металлические рифленые пластины, связанные с внутренним наполнителем из газонаполненной пластмассы или минеральной ваты, которые являются основными изоляционными наполнителями при производстве стеновых сэндвич-панелей и широко применяются как в России, так и в зарубежных странах. Утеплитель/наполнитель (минеральная вата или газонаполненная пластмасса) крепятся на внешней и внутренней металлической облицовке при помощи специального клея, состав которого должен минимально содержать горючие и токсичные вещества (рис. 6).

Теплоизоляционные и технические характеристики газонаполненных пластмасс и минеральной ваты детально изложены в научной работе [17]. Следует подчеркнуть, что коэффициент теплопроводности

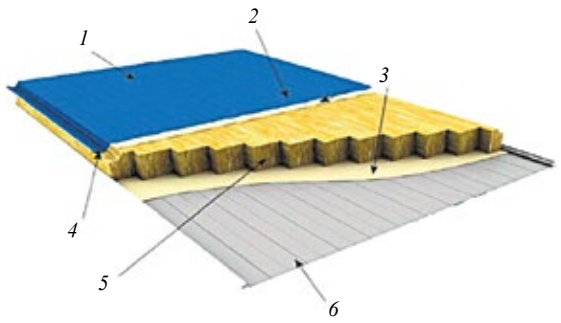


Рис. 6. Общая конструкция стеновой сэндвич-панели: *1* — защитное покрытие; *2* — тонколистовая сталь; *3* — клеящий слой; *4* — замок; *5* — наполнитель (термоизоляционный материал); *6* — тонколистовая сталь
Fig. 6. General design of wall sandwich panel: *1* — protective coating; *2* — thin sheet steel; *3* — adhesive layer; *4* — lock; *5* — filler (thermal insulation material); *6* — thin sheet steel

газонаполненных пластмасс по расчетам [17] находится в пределах показателей 0,019–0,025 Вт/(м·К), а коэффициент теплопроводности минеральной ваты 0,052–0,058 Вт/(м·К) (табл. 1).

Газонаполненные пластмассы являются одними из самых распространенных технологичных полимерных наполнителей стеновых сэндвич-панелей, которые делятся на следующие марки: пенополивинилхлорид (PVC), пенополиуретан (PU), пенополиизоцианурат (PIR), пенополистирол вспененный (SP), пенополистирол экструдированный (XPS); такие определения также применяют в своей работе авторы [18] и подтверждают высокие свойства теплозащиты и их способность выдерживать экстремально критические температуры окружающей среды: от –65 до +110 °С. Опираясь на свои исследования [18], авторы заключили, что утеплители группы газонаполненных пластмасс имеют высокую горючесть Г1 … Г4, если не применять в качестве наполнителя инертные газы.

В работе [19] проанализировано появление на рынке нового наполнителя для сэндвич-панелей — пенополиизоцианурата. Пенополиизоцианурат, который по горючести ниже, чем пенополиуретан (Г1, т.е. слабогорючий), не поддерживает горение и затухает самостоятельно при отсутствии источника пламени.

Таблица 1. Сравнительная таблица коэффициентов теплоизоляции материалов [17]
Table 1. Comparative table of thermal insulation coefficients of materials [17]

Утеплитель Insulation	Плотность, кг/м^3 Density, kg/m^3	Теплопроводность, Вт/(м·К) Thermal conductivity, W/(m·K)
Пенополиуретан Polyurethane foam	40…160	0,019…0,025
Минеральная вата Mineral wool	55…150	0,052…0,058

Пенополиизоцианурат является модификацией пенополиуретана и производится путем экструзии при взаимодействии двух компонентов: полиола и изоцианурата.

Проведены работы [20] по исследованию теплофизических свойств полистиролсодержащих пенопластов, проведено их старение при воздействии ультрафиолетового света путем погружения в воду. Авторами доказано, что водопоглощение газонаполненной пластмассы и ультрафиолет приводят к деструкции и изменению коэффициента теплопроводности полистиролсодержащих пенопластов, другими словами, увеличивается теплопроводность за счет присутствия влаги и изменения физических свойств под воздействием ультрафиолета.

Исследования [21] доказывают, что стеновые сэндвич-панели с наполнителем из пены PVC выдерживают ударные нагрузки 5 и 10 Дж при температурах от +23 до –70 °С, что характерно для температуры окружающей среды Арктики. Но также в [21] был выявлен ряд недостатков в моделях исследования, а именно: при температуре от –20 до –70 °С образцы стеновых сэндвич-панелей показали низкую ударную прочность, нежели чем образцы при положительной температуре при таких же ударных нагрузках, а именно: если на данные модели сэндвич-панелей будет ударное воздействие, то деформация может привести к неисправностям стыковочных соединений и в РУК.

Наполнители из газонаполненных пластмасс в строительстве зданий ОПО рекомендуется применять со свойствами самозатухания и не поддерживающими горение, но данное требование не является обязательным, а носит рекомендательный характер. Метод и методика проведения испытаний эксплуатационных характеристик по теплофизическим показателям утеплителей/наполнителей сэндвич-панелей производятся по Межгосударственному стандарту[6]. И производитель стеновых сэндвич-панелей, расположенный на территории Российской Федерации, должен строго придерживаться данного стандарта.

Минеральная вата на сегодняшний день является самым высокотехнологичным и распространенным утеплителем стеновых сэндвич-панелей, из которой производятся плиты минераловатные (MW). Минеральная вата — это название группы утеплителей, изготавливаемых на основе минералов, имеет высокие показатели эффективного термического сопротивления окружающей среды. Детально описан состав теплоизоляционного материала из минеральной ваты и особенности конструкций с минеральной

[6] ГОСТ 32312–2011 (EN 14706:2005). Изделия теплоизоляционные, применяемые для инженерного оборудования зданий и промышленных установок. Метод определения максимальной рабочей температуры : Межгосударственный стандарт.

ватой в [22], также здесь указаны методы и процессы производства минеральной ваты. Следует отметить, что авторами [22] исследованы теплозащитные свойства минеральной ваты, которые в значительной степени зависят не только от качества производства минеральной ваты, но и самой ее структуры, а также немаловажным является качество монтажа.

Исследования свойств и состава минеральной ваты в качестве утеплителя и наполнителя сэндвич-панелей отражены в [23]. В ходе исследования проведены натурные испытания в лабораторных условиях, что позволило выявить скорость распространения горения, выгорания и тления минеральной ваты в условиях пролива/розлива ЛВЖ (дизельное топливо, бензин, машинное масло и т.п.). По итогам испытаний было установлено, что минеральная вата обладает высокой гигроскопичностью и пролитый ЛВЖ легко впитался в минеральную вату, а следовательно, дальнейшее поддержание горения и его распространение как в горизонтальном, так и вертикальном направлении по конструкции относится к недостатку данного утеплителя, также к недостатку можно отнести слеживание минеральной ваты, что делает ее недолговечной и малоэффективной с течением времени.

Работы исследователей [24] также подтверждают высокие характеристики теплопроводности минеральной ваты, но при этом связующее вещество минваты является источником передачи тепла при воздействии на нее температуры, поэтому исследователи предлагают предварительное прогревание минеральной ваты температурой +200 °С для выпаривания или кристаллизации связующего вещества, но тем не менее натурные испытания показали, что наполнитель в сэндвич-панелях из минеральной ваты является менее безопасным при пожаре, а также приемлемым для применения в качестве термоизоляции здания от воздействия температуры внешней окружающей среды.

Проведенное сравнение утеплителей [25] по теплофизическим характеристикам позволяет сравнить следующие показатели: газонаполненные пластмассы плотностью 100 кг/м^3 с коэффициентом теплопроводности 0,041 при толщине 135 мм и минеральную вату плотностью 75 кг/м^3 с коэффициентом теплопроводности 0,058 при толщине 175 мм. Исходя из сравнения, следует вывод, что газонаполненные пластмассы имеют ниже теплопроводность относительно минеральной ваты, но к недостаткам газонаполненных пластмасс относится их горючесть, которая имеет группу от Г1 до Г4, а также дымообразующую способность от Д1 до Д3, что в данном сравнении делает утеплитель из минеральной ваты более безопасным для людей, здания/сооружения, оборудования и экологии в случае пожара. Поэтому утеплитель из минеральной ваты является самым распространенным утеплителем в производстве стеновых сэндвич-панелей, такого же вывода придерживается автор в работе [26] по исследованию качества сэндвич-панелей в области пожарной безопасности зданий.

Исследования сэндвич-панелей по теплоизолирующим свойствам изложены в работе [27], где подтверждается безопасность применения теплоизоляционных материалов и их эстетический вид при строительстве зданий. Что касается эстетического вида, некоторые исследователи придерживаются иной точки зрения, так как постоянное воздействие ультрафиолета со временем немного меняет цвет наружной стороны сэндвич-панелей, также сэндвич-панели легко деформировать при транспортировке или монтаже.

Рассмотрены результаты научной работы [28], в которой авторы приходят к выводу, что не все наполнители сэндвич-панелей из минеральной ваты, а также газонаполненных пластмасс имеют соответствующую группу горючести НГ или Г1, а следовательно, степень огнестойкости их снижается. Эти исследования показали, что в утеплителе из минеральной ваты производитель допускает наличие в волокнах промежуточных продуктов горения, так называемых связующих веществ, в том числе фенолформальдегидные смолы, гидрофобизирующие, биоцидные добавки и т.д.; из чего следует вывод, что требуется усовершенствование системы сертификации в области определения горючести и огнестойкости изоляционных материалов, а также дополнительный контроль надзорных органов за качеством заявленных в сертификате безопасности материалов.

Автор научной работы [29] предлагает дополнительное решение по усилению термического сопротивления здания окружающей среде, а именно повышение теплоизоляционных свойств существующих сэндвич-панелей путем наложения отражательного изоляционного слоя на внутреннюю ее часть; данный отражатель будет иметь свойства фольги и высокие отражающие свойства. Авторы считают, что данное научное решение как дополнение к общей системе защиты здания может считаться эффективным, но только в совокупности со всей системой защиты здания и защитными функциями ЛСК.

Другое инновационное решение в разработке легкосбрасываемых конструкций на основе сотовых поликарбонатных листов (СПЛ) изложено в работе [30], где предлагается монтаж блоков ЛСК с гибким ограждением на основе СПЛ, при этом авторы подчеркивают, что применение СПЛ толщиной 8 мм требует дополнительных исследований. В работе [30] отсутствуют исследования о влиянии

экстремально низких температур на работоспособность СПЛ.

Типы существующих ЛСК и патенты

Сэндвич-панель — это строительный материал, имеющий трехслойную структуру, состоящую из двух листов жесткого материала (металл, поливинилхлорид, магнезитовая плита) и слоя утеплителя между ними, а ЛСК — это ограждающая строительная конструкция, позволяющая освободить наружный стеновой проем при воздействии на нее аварийных нагрузок внутреннего, например дефлаграционного, взрыва (определения см. п. 3.2, 3.3, ГОСТ Р 56288–2014[7]) или волновых явлений последствий локального взрыва.

В производственных помещениях категорий А, Б по пожарной и взрывопожарной опасности следует предусматривать наружные легкосбрасываемые ограждающие конструкции. В качестве ЛСК следует использовать одинарное остекление окон и фонарей. При недостаточной площади остекления допускается в качестве ЛСК использовать конструкции покрытий с кровлей из стальных, алюминиевых, хризотилцементных и битумных волнистых листов, из гибкой черепицы, металлочерепицы, хризотилцементных и сланцевых плиток и эффективного негорючего утеплителя. И, как указывалась выше (см. стр. 30), ковровая площадь ЛСК для защиты зданий при отсутствии расчетных данных должна составлять не менее 0,05 м^2 на 1 м^3 объема помещения категории А и не менее 0,03 м^2 — помещения категории Б[2].

Исследования сэндвич-панелей показывают, что наполнитель в сэндвич-панелях из минеральной ваты является менее безопасным при пожаре, а также приемлемым для применения в качестве термоизоляции здания от воздействия температуры внешней окружающей среды. Металлическая облицовка сэндвич-панели, выполненная из низкоуглеродистой горячеоцинкованной стали с защитно-декоративным полимерным покрытием, является отличной защитой сэндвич-панели от истирания и агрессивной окружающей среды (кислотная среда, солнечное излучение — ультрафиолет, перепад температур), что доказано исследованиями, проведенными авторами в натурных испытаниях [31].

В мире процесс строительства быстровозводимых зданий из ЛМК ведется по методикам, разработанным как специализированными строительными институтами, так и строительными компаниями по их разработанным строительно-техническим условиям (СТУ). В Российской Федерации был отменен институт строительства зданий и сооружений по СТУ[8]. Средний срок службы быстровозводимого здания из ЛМК составляет 20–30 лет, но имеются здания из сэндвич-панелей сроком службы до 50 лет. Формы сооружений и зданий могут иметь разную конфигурацию, в научной работе [32] упоминается четыре конфигурации сооружений производственного значения, такие как арочная, прямоугольная, полигональная и шаровая. Предложенные конфигурации, как правило, выполняются из облегченного стального прокатного профиля (двутавровый), выполняющего функции несущей конструкции (колонна), а в качестве конструктивных элементов применяются балки, фермы, колонны, стойки и т.д., в качестве стен — стеновые сэндвич-панели, которые крепятся по наружным граням колонн. Исследованиями [32] выявлено, что в основу применения быстровозводимых зданий/сооружений закладывается коммерческая составляющая, а в случае неправильной оценки рисков и опасностей на этапе монтажа конструкции не всегда преследуются интересы промышленной безопасности и охраны труда, что в краткосрочной перспективе является выгодным, но в долгосрочной неучтенные риски и опасности приводят к авариям и остановке производства с последующими репутационными потерями и материальными убытками.

Для решения задач по контролю за показателями микроклимата в помещениях сооружений ОПО необходимо обеспечить данные помещения автоматизированными климатическими контроллерами или системами, которые в отсутствие обслуживающего персонала непосредственно в помещении сооружения автономно с использованием алгоритмов программ круглосуточно предоставляют дежурному оператору информацию о состоянии климата в конкретном защищаемом помещении, что позволяет ему принять самостоятельное решение о включении соответствующих систем, например отопительных приборов, увлажнителей и т.п.; либо автономная система, согласно заложенной программе, автоматически включит приборы. Исследования в данном направлении [33] указали на необходимость в дополнительном контроле за микроклиматом в производственном и ином помещении ОПО с выводом на контрольную панель дежурного оператора/диспетчера, а также (желательно) на индивидуальный контроль со стороны обслуживающего персонала.

Для защиты здания от избыточного давления или аварийного взрыва 5 кПа и выше еще на стадии проектирования ОПО у организаций возникает потреб-

[7] ГОСТ Р 56288–2014. Конструкции оконные со стеклопакетами легкосбрасываемые для зданий. Технические условия.

[8] О признании утратившими силу приказов Министерства строительства и жилищно-коммунального хозяйства Российской Федерации от 30.11.2020 № 734/пр, от 22.10.2021 № 774/пр : Приказ Министерства строительства и жилищно-коммунального хозяйства Российской Федерации от 04.04.2024 № 241/пр.

ность предусмотреть ЛСК. Тип ЛСК обуславливается регионом местонахождения ОПО, следовательно, если местом нахождения ОПО является Арктика, то в данном случае требуется применять ЛСК, которые имеют высокие теплопроводные свойства. Таким материалом являются сэндвич-панели, так как их конструкция позволяет выполнять функции теплозащиты здания в большей степени, нежели чем обычные ЛСК, выполненные из металлического листа или оконного блока, остекленного одним стеклом, ранее указывалось, что применять в качестве ЛСК стеклопакет не допускается.

Для упрощения далее по тексту в настоящей работе определения ЛСК из сэндвич-панелей используется термин легкосбрасываемая сэндвич-панель (ЛССП), данный термин имеет такое же конструктивное решение по защите здания, как легкосбрасываемая конструкция (ЛСК) или предохранительная конструкция (ПК), разница лишь в том, что ЛССП конкретно указывает на принадлежность к сэндвич-панелям. В проанализированных авторами научных работах термин легкосбрасываемые конструкции из сэндвич-панелей или аббревиатура ЛССП отсутствуют, поэтому данный термин и его аббревиатура принадлежат авторам настоящей статьи. ЛССП — это легкосбрасываемая сэндвич-панель, выполненная из двух рифленых (нерифленых) листовых металлических пластин, связанных между собой внутренним наполнителем, имеющих специальные РУК для крепления к конструкции здания/сооружения.

Подчеркнем, что предназначение ЛССП по защите здания от аварийных взрывов ничем не отличается от обычного ЛСК, а вот технические характеристики уже отличаются, так как ЛССП является легкосбрасываемой конструкцией с высокими теплоизоляционными свойствами и универсальностью в применении. Как правило, изолирующим материалом служит газонаполненная пластмасса или минеральная вата, либо иной наполнитель. Предпочтение тому или иному изоляционному материалу следует отдавать исходя из особенностей объекта строительства и его назначения. В целом акцент выбора наполнителя для ЛССП должен основополагаться на безопасности для окружающей среды и людей, но никак не на экономические составляющие.

В работах [34, 35] детально исследовано применение сэндвич-панелей как ЛСК, а натурными испытаниями подтверждена эффективность применения сэндвич-панелей в качестве ЛСК. Единственным недостатком предложенных моделей является то, что применение сэндвич-панелей в качестве ЛСК предполагается в условиях умеренного климатического пояса России и не рассматривается вариант применения их в Арктической зоне, а предложенный вариант [36] технического перевооружения стеновых сэндвич-панелей в ЛСК путем удаления самонарезных болтов, кроме четырех, прикрепленных к несущим металлическим конструкциям, требует дополнительного и детального исследования при экстремально низкой температуре в условиях ветровых нагрузок, которые могут сильно повлиять на работоспособность ЛСК. Поэтому такой принцип работы ЛСК должен являться индивидуальным и рассматриваться в каждом конкретном случае монтажа для каждого отдельного здания/сооружения, если строительство объекта производится в зоне снеговой и ветровой нагрузок *V* и выше[9] (СП 20.13330.2016 «Нагрузки и воздействия»).

Далее проведен анализ существующих патентов ЛСК, типы которых применяются в Российской Федерации и за рубежом, авторы патентов предлагают применять их модели или изобретения в качестве ЛСК для строительства промышленных зданий, в которых может образовываться избыточное давление, возникающее в результате аварийного взрыва. Выделены основные патенты на изобретения (модели), а также представлен краткий обзор и вывод предлагаемого ЛСК.

1. Известна модель ЛСК[10]. Изделие указано на рис. 7, *а*.

Принцип работы модели ЛСК: под воздействием внутреннего избыточного давления на ЛСК (до 70 кг/м^2) происходит разрушение механизма *1* (рис. 7, *b*), а точнее элемента *21*, закрепленного на шпильке *18* с последующим выдавливанием ЛСК из проема с удержанием ЛКС в подвешенном состоянии при помощи страховочных стальных оцинкованных тросов.

Рассмотренная модель ЛСК эффективна для применения в условиях умеренного климатического пояса России, где средняя температура окружающей среды в зимнее время года не становится ниже –20 °С. В случае эксплуатации подобной модели в условиях температуры окружающей среды –41 °С и ниже в местах крепления легкосбрасываемого механизма *1* (рис. 7, *а*) может образоваться конденсат/наледь, а также возможно образование плотного снежного намета или наледи на выступе в зоне *8* (рис. 7, *а*). Эти влияния не были исследованы автором патента, что, соответственно, делает предлагаемую конструкцию малоэффективной для эксплуатации в Арктической зоне в качестве ЛСК.

2. Также известна модель ЛСК[11]. Изделие ЛСК указано на рис. 8. Принцип работы модели ЛСК: под воз-

[9] СП 20.13330.2016. Свод правил. Нагрузки и воздействия. Актуализированная редакция СНиП 2.01.07–85* (утв. Приказом Минстроя России от 03.12.2016 № 891/пр) (ред. от 30.12.2020).

[10] Патент RU 164516 U1. Легкосбрасываемая конструкция взрывоопасных помещений на базе блока оконного из поливинилхлорида.

[11] Патент RU 177097 U1. Легкосбрасываемая ограждающая строительная конструкция для взрывоопасных помещений.

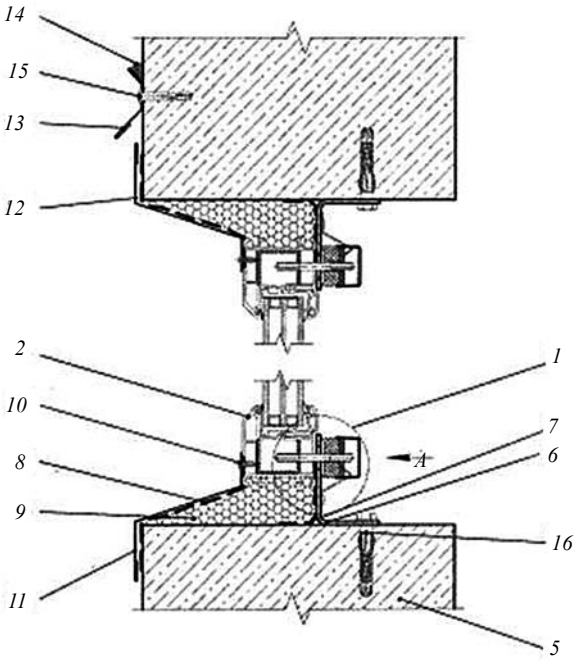


Рис. 7, *а*. Модель ЛСК[9]. Изображение схемы общего вида легкосбрасываемой конструкции на базе блока оконного из поливинилхлорида: *1* — разрушаемый узел крепления рамы; *2* — легкосбрасываемая конструкция; *5* — стеновой проем; *6* — базовый элемент (основание); *7* — лента; *8* — паропроницаемая и гидроизолирующая лента; *9* — утеплитель (минеральная вата); *10* — саморез с пресс-шайбой; *11* — нижний отлив; *12* — вентиляция для минеральной ваты утеплителя; *13* — желобковая часть верхнего отлива; *14* — атмосферостойкий герметик; *15* — крепежные элементы; *16* — крепежные элементы (шпилек-саморезов)

Fig. 7, *a*. Model of LRS[9]. Image of the general appearance of an lightweight removable structure based on a PVC window block: *1* — destructible frame fastening unit; *2* — lightweight removable structure; *5* — wall opening; *6* — base element (foundation); *7* — tape; *8* — vapor-permeable and waterproofing tape; *9* — insulation (mineral wool); *10* — self-tapping screw with press washer; *11* — lower ebb; *12* — ventilation for mineral wool insulation; *13* — grooved part of the upper ebb; *14* — weather-resistant sealant; *15* — fasteners; *16* — fasteners (studs-self-tapping screws)

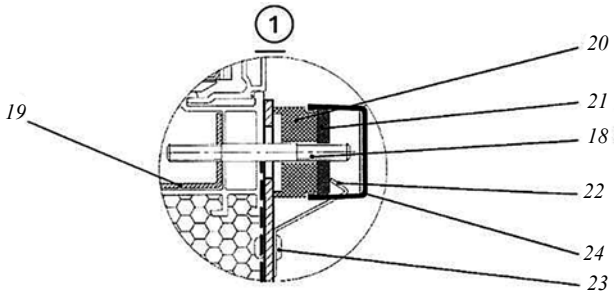


Рис. 7, *b*. Модель легкосбрасываемой конструкции[9], легкосбрасываемый элемент, разрушаемый узел крепления рамы: *18* — шпилька; *19* — стальной армирующий профиль; *20* — дистанционная распорная втулка; *21* — разрушаемый элемент; *22* — пружинный фиксатор; *23* — заклепка; *24* — защитный колпак

Fig. 7, *b*. Model of LRS[9], an easily detachable element, destructible frame fastening unit: *18* — stud bolt; *19* — steel reinforcing profile; *20* — spacer sleeve; *21* — destructible element; *22* — spring retainer; *23* — rivet; *24* — protective cap

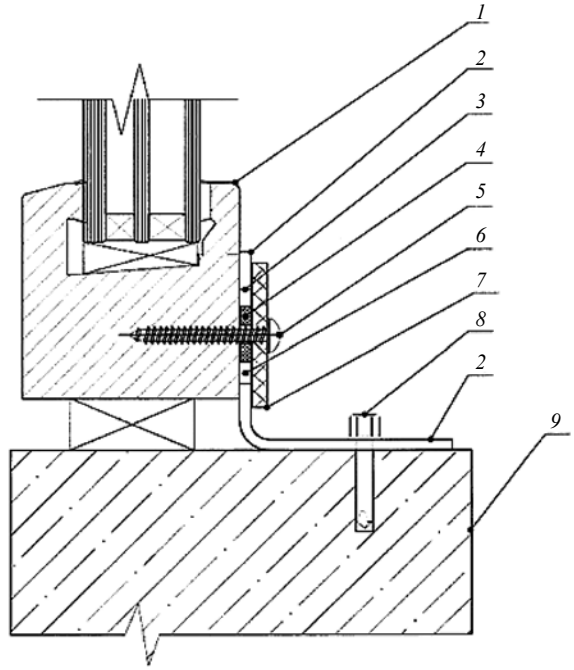


Рис. 8. Модель ЛСК[10]. Общий вид конструкции: *1* — смещаемый элемент; *2* — опорный кронштейн; *3* — дистанционная шайба; *4* — отверстие в кронштейне; *5* — винт; *6* — зазор; *7* — разрушаемая шайба; *8* — крепление кронштейна к каркасу (стене) здания; *9* — стена или силовой каркас здания

Fig. 8. Model LRS[10]. General view of the structure: *1* — displaceable element; *2* — support bracket; *3* — spacer washer; *4* — hole in the bracket; *5* — screw; *6* — gap; *7* — destructible washer; *8* — bracket fastening to the frame (wall) of the building; *9* — wall or load-bearing frame of the building

действием внутреннего давления (до 70 кг/м^2) на каркас ЛСК *1* происходит вскрытие винта *5* вместе с дистанционной шайбой *3*, в результате смещаемый каркас отсоединяется от опорного кронштейна *2* с последующим высвобождением проема.

Предложенная модель ЛСК, как и предыдущая, эффективна для применения в условиях умеренного климатического пояса России, где средняя температура окружающей среды в зимнее время года не понижается –20 °С и ниже. Для применения данной конструкции в качестве ЛСК на взрывоопасных помещениях в условиях температуры окружающей среды –41 °С и ниже конструкцию ЛСК необходимо исследовать в температурных режимах Арктической зоны, так как существует вероятность, что утеплитель/теплоизолятор, установленный между силовым каркасом сооружения *9* и ЛСК *1*, подвергнется обледенению или на нем может образоваться конденсат. Также практическое применение данной конструкции, а именно стеклопакета, в условиях экстремально низких температур малоэффективное.

3. Следующая модель ЛСК[12]. Изделие ЛСК указано на рис. 9. Принцип работы модели ЛСК: при

[12] Патент RU 193045 U1. Легкосбрасываемая ограждающая конструкция для взрывоопасных помещений.

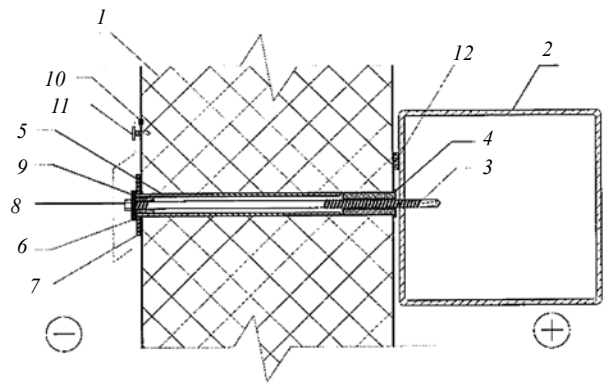


Рис. 9. Модель ЛСК[11]. Общий вид конструкции: *1* — ЛСК-панель; *2* — каркас здания; *3* — самонарезающий винт; *4* — центрирующая втулка; *5* — дистанционная втулка; *6* — разрушаемый элемент с шайбой; *7* — усиливающая шайба; *8* — головка самонарезающего винта; *9* — центрирующий элемент; *10* — фасонный элемент; *11* — винт; *12* — уплотнитель

Fig. 9. Model LRS[11]. General view of the structure: *1* — LRS panel; *2* — building frame; *3* — self-tapping screw; *4* — centering sleeve; *5* — spacer sleeve; *6* — destructible element with washer; *7* — reinforcing washer; *8* — head of self-tapping screw; *9* — centering element; *10* — shaped element; *11* — screw; *12* — seal

образовании давления до 5 кПа внутри помещения (авторы указывают дефлаграционный взрыв) ЛСК давление давит на ЛСК и под воздействием нагрузки на элемент *6* головка самонарезающего винта *8* продавливает и сминает элемент легкосбрасываемого крепления *6*. При этом конструкция ЛСК высвобождает проем и удерживается на страховочных тросах. Таким образом происходит сброс давления внутри помещения.

Рассмотренная модель ЛСК, как и предыдущие, имеет недостатки, если данная ЛСК будет применяться в Арктической зоне. Недостатками технического решения являются следующие:

- узел легкосбрасываемого крепления не имеет защиты от внешних осадков (дождь, снег). Таким образом, дистанционная втулка *5* подвергается наполнению осадками с последующим образованием льда/наледи при минусовой температуре окружающей среды, также не исключено образование ржавчины на металле дистанционной втулки *5* и самонарезающего винта *3*;
- отсутствует решение об исключении образования конденсата/наледи в местах соприкосновения дистанционной втулки *5* с каркасом здания и врезки самонарезающего винта *3* в металлический каркас, так как уплотнитель *12* установлен только с одной стороны;
- не раскрыт вопрос, каким образом высвобождается ЛСК *1* из замковых соединений верхней и нижней стеновых панелей;
- не представлено решение об исключении попадания осадков (дождь, снег) в наполнитель сте-

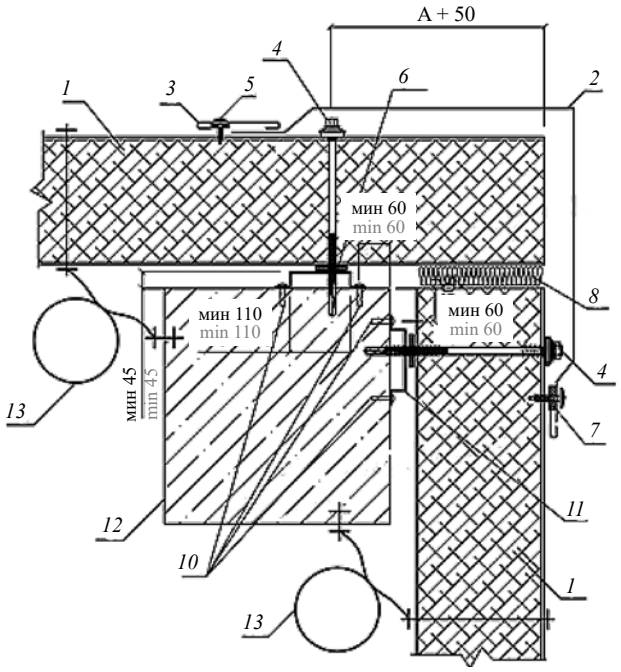


Рис. 10, *a*. Модель ЛСК в сборе с легкосъемным саморезом от компании ООО «Металл Профиль»: *1* — трехслойная сэндвич-панель МП ТСП-Z; *2* — стыковочный элемент ФИ54, t = 0,5 мм; *3* — стыковочный элемент ФИ53, t = 0,5 мм; *4* — легкосбрасываемое крепление (узел 5), шаг по расчету; *5* — саморез 04,2 × 16(19) с прессшайбой или 04,8 × 28 с ЭПДМ-прокладкой или заклепка 03,2 × 8 (цветная комбинированная), шаг 300 мм; *6* — уплотнитель терморазделяющая полоса; *7* — герметик силиконовый; *8* — минеральная или стекловата легких марок; *9* — металлическая стойка или колонна; *10* — дюбель, шаг 600 мм; *11* — профиль оцинкованный ФИУ5, t = 2,0 мм; *12* — железобетонная колонна; *13* — крепление демпфирующей петли М20 (узел 3)

Fig. 10, *a*. Model LRS assembled with easily removable self-tapping screws of company LLC "Metal Profile": *1* — three-layer sandwich panel MP TSP-Z; *2* — jointing element FI54, t = 0.5 mm; *3* — jointing element FI54, t = 0.5 mm; *4* — lightweight fastening (node 5), spacing as per calculation; *5* — self-tapping screw 04.2 × 16(19) with a press washer or 04.8 × 28 with EPDM gasket or rivet 03.2 × 8 (coloured combined), spacing 300 mm; *6* — sealant thermally separating strip; *7* — silicone sealant; *8* — mineral or glass wool of lightweight grades; *9* — metal post or column; *10* — anchor, step 600 mm; *11* — galvanized profile FIU5, t = 2.0 mm; *12* — reinforced concrete column; *13* — damping loop fastener M20 (node 3)

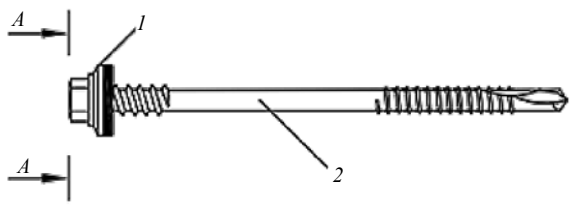


Рис. 10, *b*. Модель легкосъемного самореза ЛСК компании ООО «Металл Профиль»: *1* — ослабленная шайба; *2* — саморез со сточенной шляпкой

Fig. 10, *b*. Model easy-release screw of the LRS of company LLC "Metal Profile": *1* — loosened washer; *2* — self-tapping screw with cropped flat

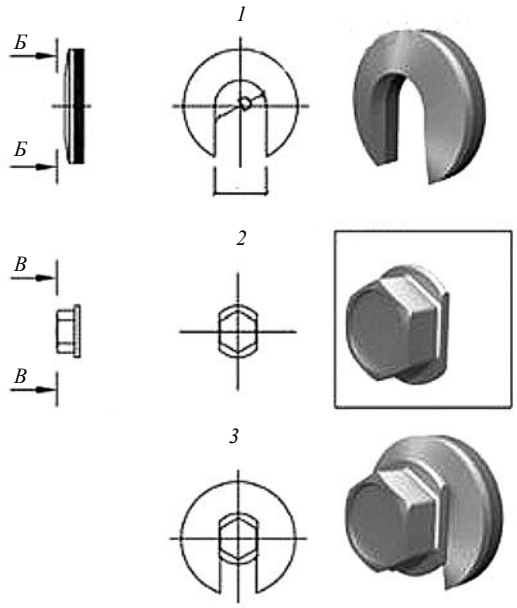


Рис. 10, *с.* Модель легкосъемного болта ЛСК компании ООО «Металл Профиль»: *1* — сточенная шайба для самореза; *2* — сточенный фланец головки самореза; *3* — общий вид головки самореза со сточенным фланцем и сточенной шайбой самореза
Fig. 10, *c.* Model easy-release screw of the LRS of company LLC "Metal Profile": *1* — cropped washer for self-tapping screw; *2* — cropped washer flange of self-tapping screw head; *3* — general view of self-tapping screw head with cropped washer flange and cropped washer of self-tapping screw

новой сэндвич-панели и ЛСК в боковых стыковочных местах.

4. Также известна модель ЛСК, представленная в проекте производства работ компании ООО «Компания Металл Профиль». Смонтированное изделие ЛСК вместе с элементом легкосбрасываемого крепления указано на рис. 10, *а*, отдельно легкосбрасываемое крепление, а именно болт и шайба, на рис. 10, *b*. Принцип работы предложенной модели ЛСК: при образовании избыточного давления 1 кПа внутри помещения, например газораспределительного пункта, давление давит на ЛСК *1* (рис. 10, *а*), которое закреплено легкосбрасываемыми саморезами *4* (рис. 10, *а*), под воздействием нагрузки сточенный фланец головки самореза *2* (рис. 10, *с*) слетает со сточенной шайбы самореза *1* (рис. 10, *с*), и таким образом ЛСК освобождается от удержания и высвобождает проем, повиснув на демпфирующих петлях *13* (рис. 10, *а*).

Монтаж легкосъемного болта следующий: прижимная шайба отделяется от ЭПДМ прокладки, откусывается или отпиливается на расстояние, равное диаметру ее отверстия (ØD = B). После этого шайба собирается обратно с ЭПДМ-прокладкой и одевается на саморез SmartBOLT. При монтаже шайбу располагать откусанной или отпиленной стороной вниз для предотвращения затекания и скапливания воды. Для предотвращения попадания влаги и возможной коррозии рекомендуется на незащищенные фасонными изделиями саморезы устанавливать декоративные колпачки в цвет фасада.

Для применения легкосъемного крепления к определенной конструкции требуется провести соответствующий расчет. Известно, что максимальное избыточное давление, которое может выдержать здание: кирпичное — от 2 до 4 кПа, бетонное — от 8 до 10 кПа [37], а давление вскрытия ЛСК должно соответствовать следующему критерию (1):

$$P_{\text{П.В}} \le \Delta P_{\text{ВСК}} \le P_{\text{ДОП}}, \quad (1)$$

где $P_{\text{П.В}}$ — расчетное значение пиковой ветровой нагрузки по СП 20.13330.2016[9] (с учетом коэффициента надежности для ветровой нагрузки), Па;
$\Delta P_{\text{ВСК}}$ — избыточное давление вскрытия ЛСК, Па;
$P_{\text{ДОП}}$ — допустимое давление на несущие конструкции здания, определяемое заданием на проектирование.

Таким образом, для разрушения легкосъемного крепления избыточное давление на легкосбрасываемую конструкцию *1* (рис. 10, *а*) должно составлять для зданий газораспределительного пункта ≤ 1 кПа, а для насосно-компрессорного отделения ≤ 2 кПа[13].

Рассмотренная модель ЛСК также имеет недостатки, если данная модель ЛСК будет применяться в Арктической зоне. Недостатками технического решения является следующее:

- отсутствуют исследования данной модели в условиях, приближенных к экстремально низким температурам, так как при воздействии отрицательных температур сэндвич-панели толщиной более 100 мм не производились;
- не проводились исследования влияния отрицательных температур на металл сэндвич-панелей, так как металл имеет свойства сжиматься и расширяться *4* (рис. 9);
- влияние ветровых нагрузок может привести к расширению просверленного отверстия под саморез, а также к люфту и выпаданию откусанной шайбы самореза *1*, *2* (рис. 10, *с*), в результате чего осадки могут попасть внутрь, образовывая наледь, а также коррозию;
- также не совсем ясно, как будет работать элемент замкового соединения ЛСК в условиях экстремально низких температурах, так как в местах замкового соединения может образоваться наледь, что повлияет на время сброса ЛСК.

[13] *Комаров А.А., Громов Н.В.* Отчет о выполнении работы по теме: Разработка методики расчетов и рекомендаций по монтажу легкосбрасываемых конструкций из стеновых трехслойных сэндвич-панелей производства ООО «Компания Металл Профиль», обеспечивающих безопасные нагрузки при аварийных взрывах. 2017. URL: https://metallprofil.tj/upload/iblock/456/Otchet_o_vozmozhnosti_primeneniya_TSP_v_kachestve_LSK_MGSU_2017_.pdf

Защита здания и АСДНР

При анализе сценария внутреннего аварийного взрыва ГПВС по факту пролива/утечки ЛВЖ/ГГ на производственном объекте в Арктике выявляется факт воздействия экстремально низкой температуры окружающей среды: ниже — 36 °С на замковые соединения ЛСК и РУК, что приводит к риску задержки или вообще невскрытия проема ЛСК на уровне избыточного давления 5 кПа и более, который приведет к разрушению здания, пожару, ущербу, что в итоге дает понимание о применении существующих ЛСК в регионе Арктической зоны в неблагоприятных погодных условиях как малоэффективных.

Таким образом, конкретизируя причину вероятного несрабатывания ЛСК в заданном параметре, приходим к тому, что будет образовываться конденсат в виде наледи или инея на сопряженных стыках между частями конструкции ЛСК, так называемыми замковыми соединения, и стеновыми сэндвич-панелями в местах нахождения РУК (элементами крепления с металлоконструкциями здания). Касательно параметров образования наледи или конденсата, то все зависит от особенностей окружающей среды, наледь может достигать больших размеров до 1 м толщины на поверхности, а на боковых стенах до 50 см. Дополнительно к недостатку можно отнести образование мостика холода внутри конструкции сэндвич-панели, что может привести к ее деформации и существенно снижает теплозащиту изоляционного материала. Также неблагоприятные погодные условия образовывают на ЛСК большие снежные заносы, что влияет на эффективность работы ЛСК.

Решением подобной проблематики является модификация стеновых сэндвич-панелей в виде ЛСК, что, собственно говоря, в современном мире и делается, но с условием, что будут учтены особенности климатических погодных условий заполярья (Арктика), так как существующие ЛСК не до конца исследованы для таких регионов.

Для решения существующей проблематики предложен проект универсальной легкосбрасываемой конструкции из сэндвич-панелей. На рис. 11, *a* представлен проект смонтированных ЛСК в сборке со стеновыми сэндвич-панелями здания из ЛМК, а на рис. 11, *b* представлен проект в комбинации ЛСК и ЛССП в сборке со стеновыми сэндвич-панелями здания. На рис. 11, *c* представлен проект монтажа ЛССП, полностью защищающего здание.

Для определения места установки ЛССП требуется провести анализ вероятных аварийных событий с таким подходом, чтобы имелся доступ для персонала и пожарно-спасательной бригады.

Площадь и параметры ЛССП применительно как и для обычных ЛСК, но в любом случае необходимо учитывать величину и характер аварийного взрыва

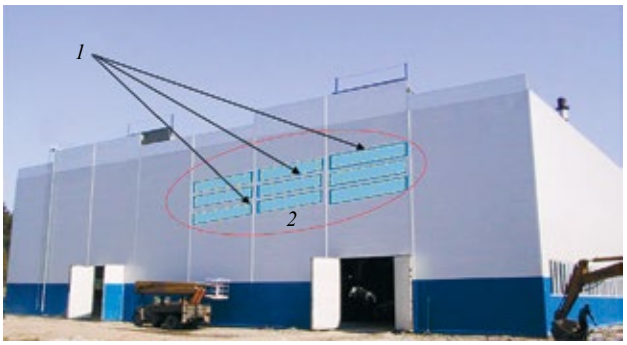


Рис. 11, *a*. Примерный дизайн установки легкосбрасываемых конструкций на производственном здании категории А или Б: *1* — смонтированные ЛСК; *2* — стеновые сэндвич-панели

Fig. 11, *a*. Model easy-release screw of the LRS of company LLC “Metal Profile”: *1* — cropped washer for self-tapping screw; *2* — cropped washer flange of self-tapping screw head

Рис. 11, *b*. Примерный дизайн установки легкосбрасываемых конструкций в комбинации с легкосбрасываемыми сэндвич-панелями на производственном здании категории А или Б: *1* — смонтированные ЛСК; *2* — стеновые сэндвич-панели; *3* — легкосбрасываемая сэндвич-панель (ЛССП)

Fig. 11, *b*. Approximate design of installation of lightweight removable structures in combine with lightweight removable panels on a production building of category A or B: *1* — installed lightweight removable panels (LRS); 2 — wall sandwich panels; *3* — lightweight removable sandwich panel (LRSP)

Рис. 11, *c*. Примерный дизайн установки легкосбрасываемых сэндвич-панелей на производственном здании категории А или Б: *1* — смонтированные легкосбрасываемые сэндвич-панели (ЛССП); *2* — стеновые сэндвич-панели

Fig. 11, *c*. Approximate design of installation of lightweight removable sandwich panel structures on a production building of category A or B: *1* — installed the lightweight removable sandwich panels (LRSP); *2* — wall sandwich panels

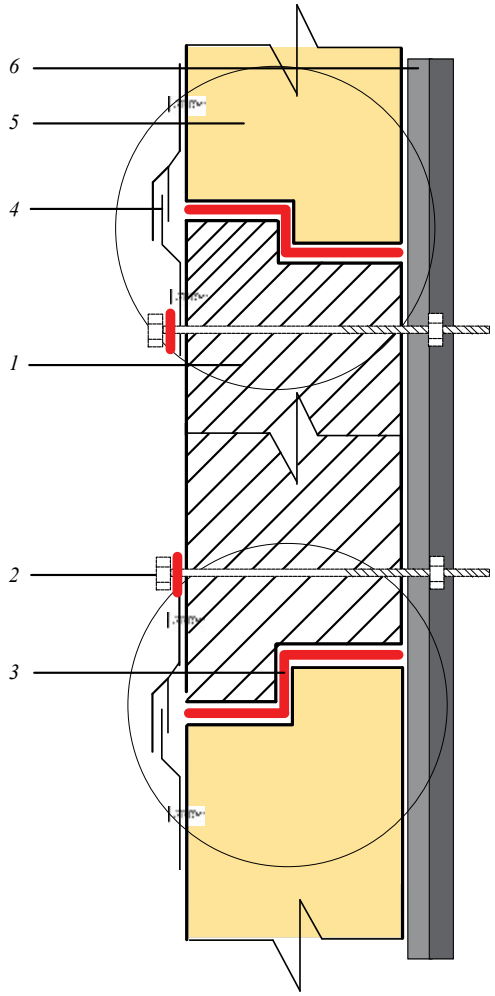


Рис. 12, *a*. Вид проекта ЛССП со ступенчатой системой термоизоляции: *1* — легкосбрасываемая сэндвич-панель; *2* — разрушаемый узел крепления; *3* — легкосъемное крепление; *4* — термоизоляционная подушка; *5* — защитная планка; *6* — стеновая панель

Fig. 12, *a*. Project view of the LRSP with staggered thermal insulation system: *1* — lightweight removable sandwich panel; *2* — destructible fastening unit; *3* — easily removable fastener; *4* — thermal insulation pad; *5* — protective strip; *6* — wall panel

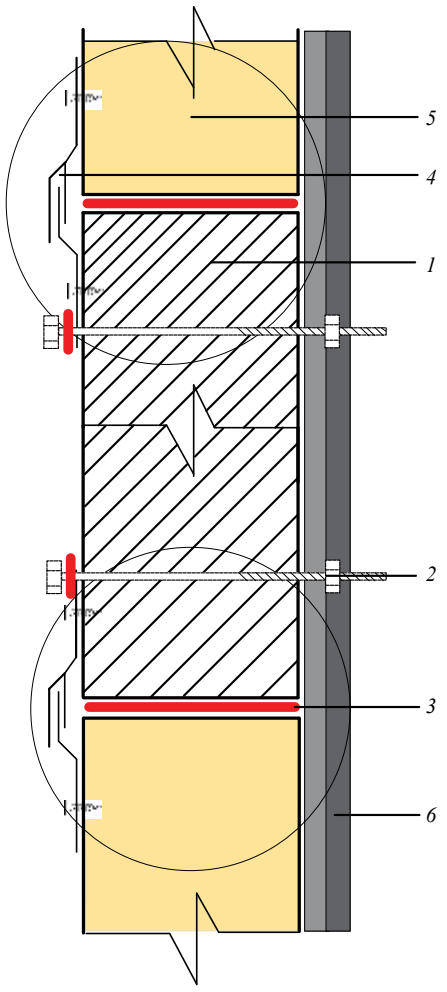


Рис. 12, *b*. Вид проекта ЛССП с плоской системой термоизоляции: *1* — легкосбрасываемая сэндвич-панель; *2* — разрушаемый узел крепления; *3* — легкосъемное крепление; *4* — термоизоляционная подушка; *5* — защитная планка; *6* — стеновая панель

Fig. 12, *b*. Project view of the LRSP with flat thermal insulation system: *1* — lightweight removable sandwich panel; *2* — destructible fastening unit; *3* — easily removable fastener; *4* — thermal insulation pad; *5* — protective strip; *6* — wall panel

или волновых явлений, которые непосредственно воздействуют на ЛССП. Исследования в области определения параметров предохранительных конструкций проводились в работах [38], где представлена модель предохранительной конструкции с расчетными математическими и экспериментальными данными. Следовательно, в дальнейших исследованиях ЛССП требуется провести подобные математические и экспериментальные расчеты величин и характера аварийных взрывов для расчета критериев и параметров ЛССП.

Модель ЛССП в горизонтальном профиле, представленная на рис. 12, *a* и 12, *b*, является проектной и рассматривать ее как конкретное решение нужно только после дальнейшего ее детального исследования и проведенных испытаний. Конструктивные отличия ЛССП на рис. 12, *a* от ЛССП рис. 12, *b* заключаются в способе термоизоляции, так в ЛССП (рис. 12, *a*) способ термоизоляции представлен в ступенчатом виде, а на рис. 12, *b* представлен прямолинейный способ термоизоляции.

В зазоре между рамой крепления стеновой сэндвич-панели *5* (рис. 12, *a*) и ЛССП *1* смонтирована термоизоляционная подушка *3* (рис. 12, *a*) ступенчатым способом, конструкция ЛССП скрепляется легкосбрасываемыми креплениями *2* (рис. 12, *a*) к ЛМК здания *6* (рис. 12, *a*); для защиты от проникновения осадков и пыли на внешней стороне в стыковочных местах монтируется защитная планка *4* (рис. 12, *a*). При монтаже ЛССП производится одновременно монтаж удерживающих тросов (на рис. 12, *a* удерживающие тросы не показаны).

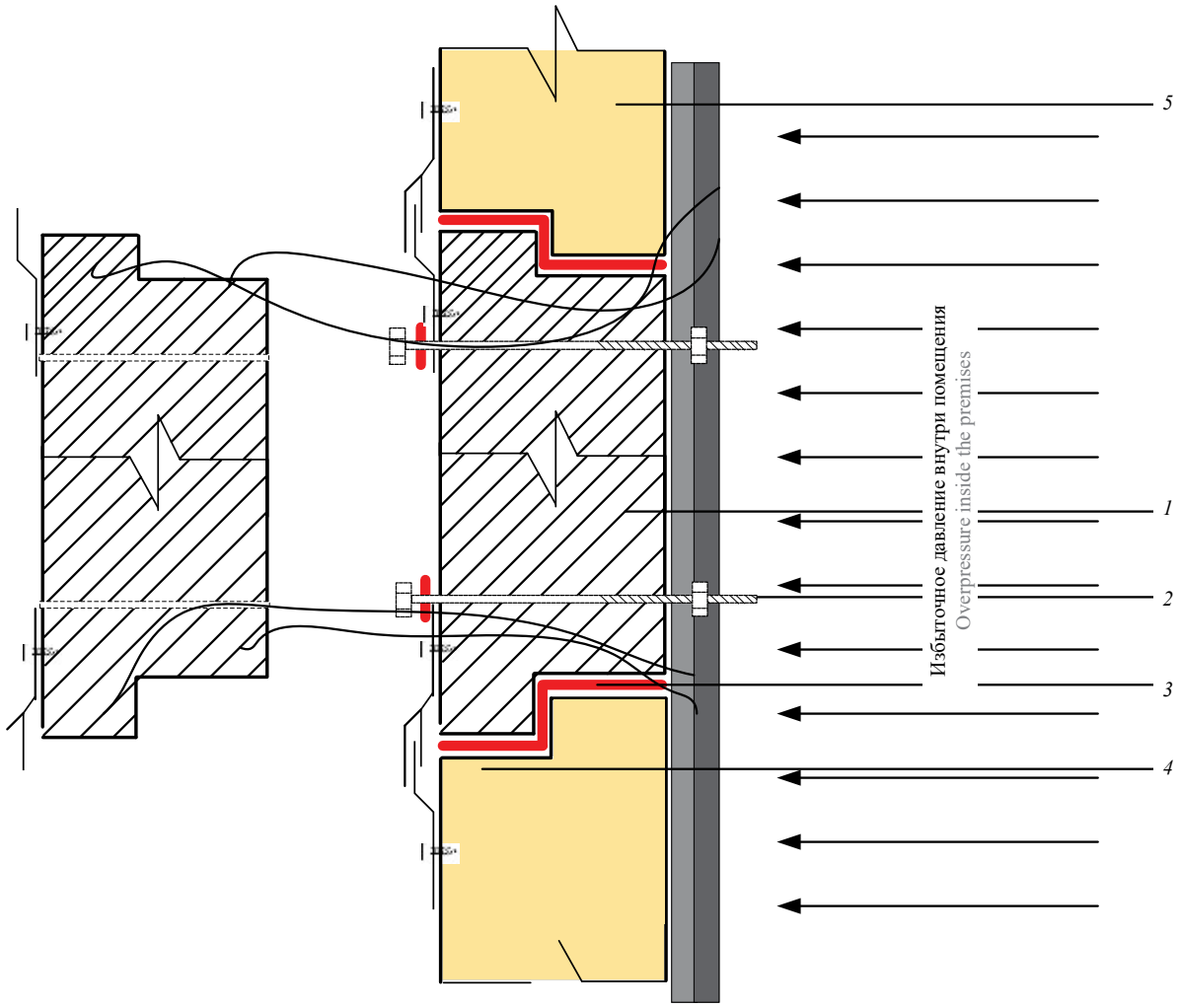


Рис. 13. Проект эффективной работы сброса ЛССП и удержание тросами в фазе гашения избыточного внутреннего давления: *1* — легкосбрасываемая сэндвич-панель; *2* — разрушаемый узел крепления; *3* — термоизоляционная подушка; *4* — удерживающий трос; *5* — стеновая сэндвич-панель

Fig. 13. Design of effective operation of LRSP resetting and retention ropes the phase of excess internal pressure reduction: *1* — lightweight removable sandwich panel; *2* — destructible fastening unit; *3* — thermal insulation pad; *4* — retaining rope; *5* — wall sandwich panel

В зазоре между рамой крепления стеновой сэндвич-панели *5* (рис. 12, *b*) и ЛССП *1* смонтирована термоизоляционная подушка, уложенная в ровной плоскости *3* (рис. 12, *b*), конструкция ЛССП скрепляется разрушаемыми узлами крепления *2* (рис. 12, *b*) к ЛМК здания *6* (рис. 12, *b*); для защиты от проникновения осадков и пыли на внешней стороне в стыковочных местах монтируется защитная планка *4* (рис. 12, *b*). При монтаже ЛССП производится одновременно монтаж удерживающих тросов (на рис. 12, *b* удерживающие тросы не показаны).

На рис. 13 предлагается схема для визуального восприятия вскрытия ЛССП из проема стеновой сэндвич-панели, где показано стрелками давление на ЛССП внутреннего взрыва, равное 1 кПа, при этом ЛССП полностью сбрасывается и освобождает проем для гашения избыточного давления в здании, таким образом предотвращая разрушения и повреждения элементов здания и оборудования, находящегося внутри. ЛССП при сбросе не улетает на удаленное расстояние, а удерживается на весу при помощи удерживающих тросов.

Проведены исследования ветровых нагрузок в работе [39], на оконных блоках легкосбрасываемых конструкций результаты подтверждают эффективность проведенного исследования, таким образом доказывая необходимость подобного исследования ветровых нагрузок на ЛССП в условиях климата Арктики.

Удерживающие тросы имеют несколько назначений: первое — удержать ЛССП от вылета на удаленное расстояние от здания в случае образования резкого избыточного давления; второе — удерживающие тросы предотвращают вылет ЛССП на большое расстояние от здания, таким образом исключают риск травмирования людей или повреждения/загроможде-

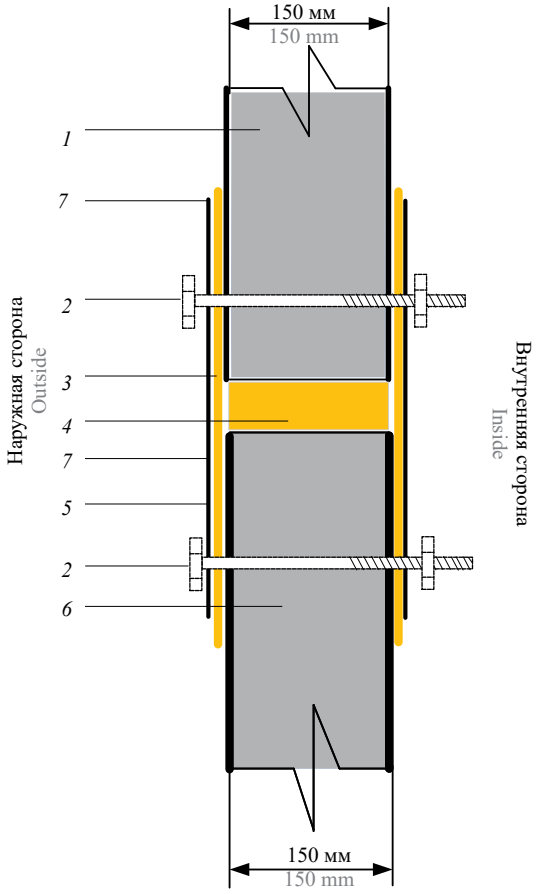


Рис. 14, *a*. Методы соединения ЛССП со стеновой сэндвич-панелью толщиной 150 мм: *1* — легкосбрасываемая сэндвич-панель; *2* — разрушаемый узел крепления; *3* — влаготермоизоляционная лента; *4* — термоизоляционная подушка; *5* — защитная планка; *6* — стеновая панель; *7* — защитная планка разрушаемого узла крепления

Fig. 14, *a*. Methods of connecting LRSP with 150 mm thick wall sandwich panel: *1* — lightweight removable sandwich panel; *2* — destructible fastening unit; *3* — moisture-insulating tape; *4* — thermal insulation pad; *5* — protective strip; *6* — wall panel; *7* — protective strip of destructible fastening unit

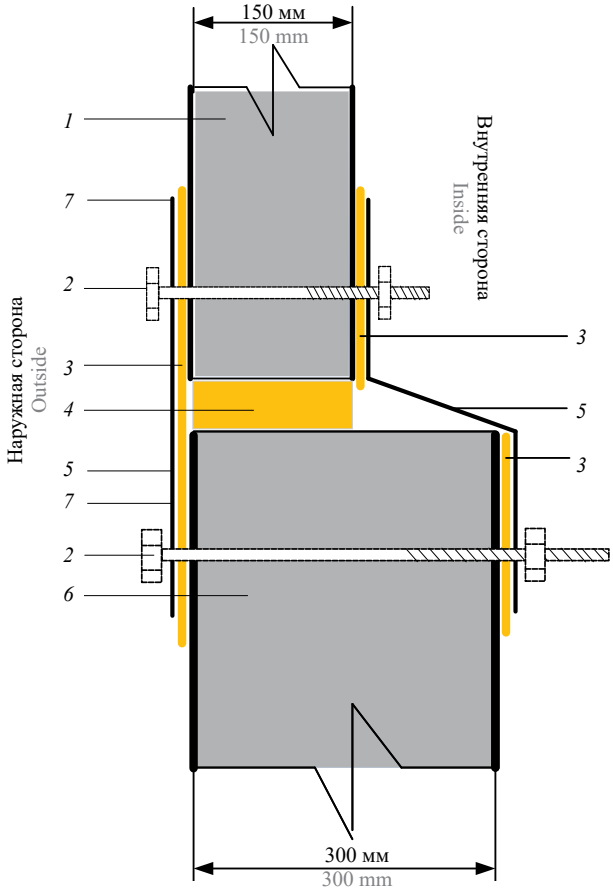


Рис. 14, *b*. Методы соединения ЛССП со стеновой сэндвич-панелью толщиной 300 мм и больше: *1* — легкосбрасываемая сэндвич-панель; *2* — разрушаемый узел крепления; *3* — влаготермоизоляционная лента; *4* — термоизоляционная подушка; *5* — защитная планка; *6* — стеновая панель; *7* — защитная планка разрушаемого узла крепления

Fig. 14, *b*. Methods of connecting LRSP with 300 mm and thicker wall sandwich panel: *1* — lightweight removable sandwich panel; *2* — destructible fastening unit; *3* — moisture-insulating tape; *4* — thermal insulation pad; *5* — protective strip; *6* — wall panel; *7* — protective strip of destructible fastening unit

ния пожарно-технического оборудования, находящихся на пути вылета ЛССП; третье — использование удерживающих и страховочных тросов для обеспечения безопасности от падения с высоты при нахождении человека на эвакуационной точке (площадке).

На этапе монтажа удерживающих тросов требуется обратить внимание на их горючие свойства, при выборе удерживающих и страховочных тросов предпочтения должны отдаваться тросам из негорючих материалов, либо металла.

Дополнительно рассмотрен вариант ЛССП для стеновых сэндвич-панелей разной толщины, на рис. 14, *a* предлагается схематическое изображение состыковки ЛССП 150 мм со стеновой сэндвич-панелью 150 мм, а на рис. 14, *b* представлен проект состыковки ЛССП со стеновой сэндвич-панелью 300 мм и более. При монтаже необходимо учесть защиту стыковочных соединений защитной планкой *5* (рис. 14, *a*, 14, *b*) от образования наледи и проникновения осадков в стыковочные соединения и РУК, термозащита должна иметь характеристики применения в условиях Арктической зоны типа влаготермоизоляционной ленты *3* (рис. 14, *a*, 14, *b*), для термоизоляции предусмотрена термоизоляционная подушка *4* (рис. 14, *a*, 14, *b*) по всей конструкции ЛССП, также должна быть предусмотрена защита для разрушаемых узлов крепления *7* (рис. 14, *a*, 14, *b*), разрушаемые узлы крепления крепятся к легким металлическим конструкциям здания *2* (рис. 14, *a*, 14, *b*). Важно отметить, что термоизоляционная подушка играет главную роль в обеспечении работоспособности ЛССП, так как в ее характеристики должны быть включены такие свойства, как исключение образования мостика холода, изоляция стыковочных мест от проникновения воды при ветровом нагоне осадков, способность

выдерживать ветровые нагрузки, а также основная ее функция — термоизоляция с такими же свойствами, как стеновая сэндвич-панель.

Для решения задач, связанных с проведением аварийно-спасательных и других неотложных работ (АСДНР), прибывшей на место аварии пожарно-спасательной части (ПСЧ) и в случае отсутствия доступа в здание с целью тушения пожара и спасения людей предложен вариант вскрытия ЛССП для открытия аварийного проема. Суть данного варианта заключается в следующем: при пожаре внутри производственного помещения и отсутствии доступа вовнутрь помещения пожарно-спасательной команды для отсечения пожара и спасения людей допускается вскрытие ЛССП с помощью наружных тросов, для этого необходимо потянуть за наружный трос для ручного сброса ЛССП *5* (рис. 15), при этом разрушаемый узел крепления *3* (рис. 15) деформируется и ЛССП освобождает проем. С учетом высоты нахождения ЛССП возможно потребуется применить автомобильный гидравлический подъемник.

На этапе монтажа удерживающих тросов требуется обратить внимание на их горючие свойства, при выборе троса предпочтения должны отдаваться тросам из негорючих материалов, либо металла.

На рис. 16 представлен проект работы ЛССП в качестве аварийной эвакуационной точки для персонала в случае чрезвычайной ситуации. Данная полезная модель устанавливается на любой высоте, в зависимости от необходимости. Монтаж полезной модели эвакуационной точки должен быть основан на проведенных оценках риска еще на этапе проектирования опасного производственного объекта или во время эксплуатации, при этом учитываются все опасности и риски.

Применение полезной модели (аварийной эвакуационной точки) оправдано только в том случае, если угроза жизни персоналу очевидна, а именно:

Рис. 15. Проект общего вида ЛССП в сборе в стеновой сэндвич-панели: *1* — легкосбрасываемая сэндвич-панель; *2* — стеновая сэндвич-панель; *3* — разрушаемый узел крепления; *4* — наружный трос ручного сброса ЛССП; *5* — знак W09 «Внимание. Опасность (прочие опасности)»; *6* — надпись «Легкосбрасываемая сэндвич-панель (для вскрытия проема потянуть за трос)»

Fig. 15. Design of general view of LRSP fixed in a wall sandwich panel: *1* — lightweight removable sandwich panel; *2* — wall sandwich panel; *3* — destructible fastening unit; *4* — external rope of LRSP manual reset; *5* — sign W09 “Warning. Danger (other hazards)”; *6* — inscription “Lightweight removable sandwich panel (pull the rope to open the opening)”

ситуация складывается таким образом, что у эвакуирующего персонала нет возможности воспользоваться стандартными эвакуационными выходами из-за наличия опасности угрозы жизни на пути к ним; для этого можно задействовать конструкцию ЛССП, при этом требуется непосредственное участие эвакуирующего персонала, а именно: необходимо найти в доступности ЛССП, подойти к нему, надавить на места, обозначенные на внутренней части ЛССП, и выдавить ЛССП *3* наружу, дождаться, когда ЛССП встанет в горизонтальное положение в виде площадки *3* с помощью удерживающих тросов *4–6*, затем проникнуть на площадку и ждать помощи ПСЧ. Площадка становится таким образом, что находится ниже уровня проема, а удерживающие тросы *5* фиксируют площадку *3* от раскачивания ее в стороны. На внутренней стороне ЛССП должна размещаться необходимая информация о порядке активации ЛССП и допустимом весе. Данные ЛССП требуется оснастить наружным аварийным освещением.

Чтобы определить количество допустимого персонала на эвакуационную точку, требуется индивидуальный подход к каждой модели с учетом климатических особенностей, при этом учитывая ветровые нагрузки. Также требуется дополнительно проработать расчет системы защиты от падения с высоты, а для персонала разработать инструкцию по применению. Для практических тренировок с персоналом необходимо использовать подобие данной модели.

На рис. 17, *a* и 17, *b* представлена более подробная проектная многофункциональная полезная модель, предназначенная для сброса избыточного давления, вскрытия проема для аварийно-спасательных и других неотложных работ (АСДНР), образования эвакуационной точки (площадки) для эвакуации персонала.

Так, на рис. 17, *a* показан вид ЛССП как один элемент от общей конструкции ЛССП, вся конструкция ЛССП состоит из двух элементов (рис. 17, *a* и 17, *b*), которые соединяются между собой. Для обозначения ЛССП требуется установить информационную табличку «Легкосбрасываемая сэндвич-панель. Для освобождения проема вскрыть панель и выдавить наружу» *1* (рис. 17, *a*), а под знаками E17 (ГОСТ 12.4.026–2015[14]) *5* (рис. 17, *a*) устанавливается табличка с текстом «Ударить здесь». В случае, если конструкцию ЛССП заклинало при ее вскрытии, то допускается продолжить вскрытие ударом ноги в место нахождения знака E17 *5*, силы удара достаточно для того, чтобы панель вскрылась, так как сила удара ногой взрослого человека может достигать до 9015 N (эквивалентно 9 кПа), а при заднем ударе ногой — до 8569 N (эквивалентно 8,5 кПа) [40].

[14] ГОСТ 12.4.026–2015. Система стандартов безопасности труда. Цвета сигнальные, знаки безопасности и разметка сигнальная. Назначение и правила применения.

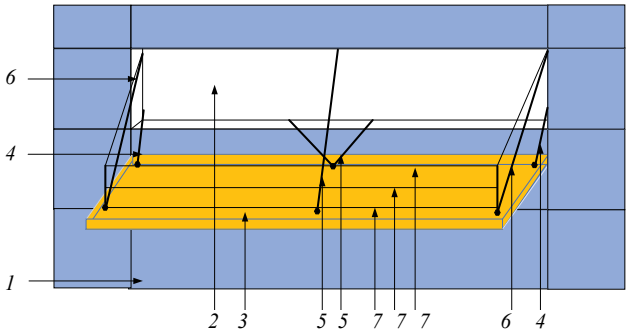


Рис. 16. Вид ЛССП во вскрытом положении: *1* — стеновая сэндвич-панель; *2* — проем; *3* — легкосбрасываемая сэндвич-панель; *4* — удерживающие тросы (нижние); *5* — удерживающие тросы (середины); *6* — удерживающие тросы (верхние); *7* — удерживающие страховочные тросы

Fig. 16. View of the LRSP in the opened position: *1* — wall sandwich panel; *2* — opening; *3* — lightweight removable sandwich panel; *4* — retaining rope (bottom); *5* — retaining rope (middle); *6* — retaining rope (top); *7* — retaining safety ropes

При вскрытии панели следует соблюдать технику безопасности, так как высота расположения ЛССП может быть выше 1,8 м, что является опасной высотой, и в случае ее падения возникает риск несчастного случая [41]. Для работы на высоте требуется использовать страховочную привязь, но в случае ЧС маловероятно, что на пострадавшем будет страховочная привязь, поэтому конструкция ЛССП имеет удерживающие тросы и страховочное ограждение *9* (рис. 10, *а*).

Метод монтажа ЛССП следующий: на ЛМК устанавливаются обычные стеновые сэндвич-панели снизу вверх, на расчетной высоте поверх стеновой сэндвич-панели монтируется уже готовая конструкция ЛССП (рис. 15). Метод сбора двух конструкций рис. 17, *а*, 17, *b* следующий: ЛССП *1* (рис. 17, *а*) устанавливается в проем *10* (рис. 17, *b*) таким образом, чтобы термоизоляционная подушка *2* (рис. 17, *а*) находилась в стыковочных местах по краям ЛССП и плотно прилегала без образования щелей, далее в подготовленные проушины *3* (рис. 17, *а*) вкручивается разрушаемый узел крепления, который изготовлен с таким учетом, что в случае определенного давления на него происходит разрыв шляпки болта. По завершении установки ЛССП *1* (рис. 17, *а*) подсоединяются удерживающие и страховочные тросы *14* (рис. 17, *b*) к крепежным элементам *8* (рис. 17, *а*), после устанавливаются надписи, таблички *5*, *6*, *7* (рис. 17, *а*) и *5*, *6* (рис. 15).

Пример расчета ЛССП для защиты здания

Для наглядной демонстрации защиты здания с применением многофункциональной модели ЛССП в комбинации с ЛСК представлен рис. 18. Вводные данные для определения количества ЛССП (то же самое, что и для ЛСК): производственное здание, в котором обращаются взрывопожароопасные вещества с температурой вспышки менее + 28 °С (метан — CH_4

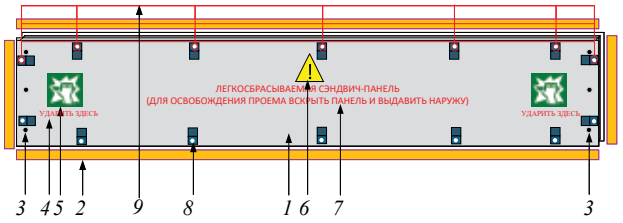


Рис. 17, *а*. Проект легкосбрасываемой сэндвич-панели (ЛССП): *1* — легкосбрасываемая сэндвич-панель; *2* — термоизоляционная подушка/лента; *3* — разрушаемый узел крепления; *4* — надпись «Ударить здесь» для таблички Е175; *5* — знак Е17 «Для доступа вскрыть здесь»; *6* — знак W09 «Внимание. Опасность (прочие опасности)»; *7* — надпись «Легкосбрасываемая сэндвич-панель (для освобождения проема вскрыть панель и выдавить наружу)»; *8* — крепежный элемент для тросов; *9* — страховочные тросы/ограждение

Fig. 17, *a*. Design of lightweight removable sandwich panel (LRSP): *1* — Lightweight removable sandwich panel; *2* — thermal insulation pad/tape; *3* — destructible fastening unit; *4* — sign "Strike here" for sign E175; *5* — sign E17 "For access, open here"; *6* — sign W09 "Warning. Danger (other hazards)"; *7* — inscription "Lightweight removable sandwich panel (to release the opening, open the panel and press outwards)"; *8* — fixing element for ropes; *9* — safety ropes/fencing

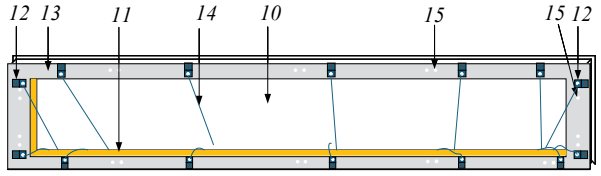


Рис. 17, *b*. Проект для монтажа легкосбрасываемой сэндвич-панели (ЛССП): *10* — проем/рама для монтажа ЛССП; *11* — термоизоляционная подушка/лента; *12* — крепежный элемент для тросов; *13* — установочная коробка для ЛССП (стеновая сэндвич-панель); *14* — удерживающие тросы/тросы; *15* — крепление, соединяющее проем/раму с ЛССП

Fig. 17, *b*. Design for installation of lightweight removable sandwich panel (LRSP): *10* — opening (manhole) for LRSP installation; *11* — thermal insulation pad/tape; *12* — fixing element for ropes; *13* — installation box for LRSP (wall sandwich panel); *14* — retaining cables/ropes; *15* — fixing with connecting LRSP

и в небольшом количестве пропан — C_3H_8); габариты производственного здания, категория производства А: длина 30 м, ширина 18 м, высота 10 м, общий объем здания 5400 м^3, общая площадь стен 960 м^2. Соответственно, данное здание относится к опасному производству, что указано в требованиях[2, 15].

Для информации: свойства метана следующие: метан — CH_4, температура вспышки = 85,1 К, (–187,9 °С) (данные из [42]), малярная масса равна 16 г/моль, что легче воздуха (малярная масса воздуха = 29 г/моль). На рис. 18 показана линия стехиометрии метана.

По имеющимся вводным производственного здания произведен расчет количества ЛССП и ЛСК, где наружные стеновые сэндвич-панели зданий

[15] СП 4.13130.2013. Системы противопожарной защиты. Ограничение распространения пожара на объектах защиты. Требования к объемно-планировочным и конструктивным решениям.

должны иметь легкосбрасываемые конструкции не менее 0,05 м² на 1 м³ объема здания; таким образом находим по формуле (2):

$$S_{\text{защ. зд}} = V_{\text{общ.зд}} \cdot 0,05 = 5400 \cdot 0,05 = 270 \text{ м}^2, \quad (2)$$

где $V_{\text{общ.зд}}$ — объем здания 5400 м³.

Согласно требованиям[2] один рулон ковровой защиты здания не может быть более 180 м², поэтому площадь ЛСК/ЛССП защиты здания 270 м² должна быть разделена на несколько рулонов по фасаду здания — *a*, *b*, *c*, *d*, где фасад *a* — правый, *b* — главный, *c* — левый, *d* — задний. Для защиты здания будет применена комбинированная система защиты, состоящая из ЛСК и ЛССП, где защита ЛСК — 210 м², а защита ЛССП — 60 м².

Для защиты здания будет применена комбинированная система защиты, состоящая из ЛСК и ЛССП, где защита ЛСК — 210 м², а защита ЛССП — 60 м².

При разделе ЛСК и ЛССП на несколько ковровых рулонов защиты здания следует провести анализ рисков вероятных аварий в производственном здании и сосредоточить наибольшее количество ЛССП и ЛСК таким образом, чтобы волна избыточного давления в случае аварии в первую очередь дошла до ЛСК и ЛССП. Также следует учесть, что метан легче воздуха, а пропан — тяжелее, и с этим учетом расположить ЛСК и ЛССП на соответствующей высоте от уровня пола.

Необходимо учесть, что внутри здания (фасад *a*) находится установка, работающая на метане, также место хранения одного баллона с пропаном (50 л), следовательно, основную площадь защиты здания (ЛСК и ЛССП) нужно разместить в верхней части здания, но также предусмотреть и защиту в нижней части.

Проведем расчет радиуса избыточного давления на его пике в результате образования дефлаграционного взрыва от пролива метана в объеме 50 л.

Согласно табл. 2 [43], определена масса окислителя для образования стехиометрической газовоздушной смеси.

Определяем параметры огненного шара *D* (диаметр) по формуле (3) [43]:

$$D_s = 6,48 \cdot m^{0,325} = 20,67 \text{ м}, \quad (3)$$

где *m* — масса мгновенно испарившегося продукта, поступившего в окружающее пространство = 35,5 кг.

Максимальное давление будет наблюдаться на границе видимости огненного шара или сферы.

Определяем максимальную величину избыточного давление на границе огненного шара по формуле (4) [43]:

$$\Delta p_{\max} = 24,22 \cdot \left(\frac{W_{\max}}{140}\right)^{1,822} \approx 4,6 \text{ кПа}, \quad (4)$$

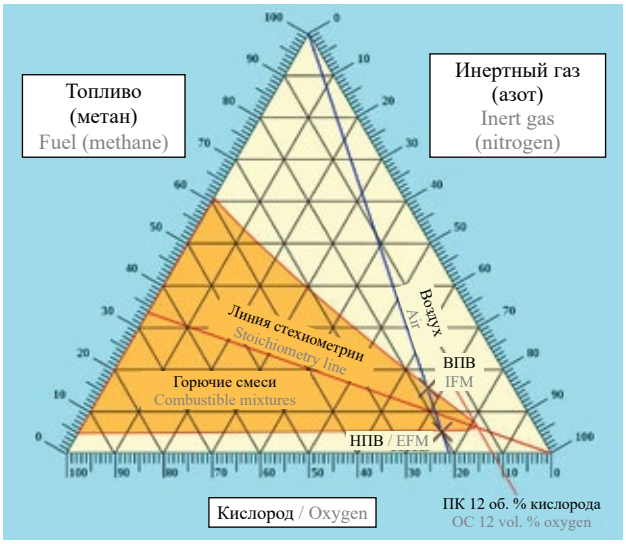


Рис. 18. Стехиометрия метана. Треугольник взрываемости ПГВС метан – кислород – азот
Fig. 18. Methane stoichiometry. Explosivity triangle of methane – oxygen – nitrogen VGAM

где $W_{\max}$ = 57, определен по формуле ($W_{\max} = W_{\max} = K_1 \cdot K_2 \cdot W_{\text{НВ}}$, где K_1 = 1; K_2 = 1; $W_{\text{НВ}}$ = 57 м). Максимальное избыточное давление на границе фронта огненного шара $P_{\max} \approx 4,6$ кПа. Приближаясь к границе огненного шара, скорость фронта огненного шара снижается, дальше избыточное давление передается волной сжатия.

Математический расчет показал, что расположение ЛСК и ЛССП должно быть смонтировано в радиусе ≈ 20 м от места инициации взрыва. Из общей площади ЛСК находим площадь защиты ЛССП, если известно, что площадь одной панели ЛССП = 5 м², а площадь ЛСК — 9 м³, находим количество панелей ЛССП и ЛСК для защиты фасада *a*, *d* здания по формуле (5):

$$S_{a,b} = S_a + S_b = 168 \text{ м}^2, \quad (5)$$

где S_a — площадь ЛССП — 60 м²;

S_b — площадь ЛСК — 108 м².

На рис. 19 представлена визуализированная схема комбинированной защиты с применением ЛСК и ЛССП. Определено, что, если фасад площадью *a* и *b* — 480 м², а площадь защиты — 168 м², то общая площадь защиты — 270 м², с учетом радиуса действия избыточного давления 20 м монтаж

Таблица 2. Критерии стехиометрического соотношения для CH_4
Table 2. Stoichiometric ratio criteria for CH_4

Окислитель Oxidiser	Масса, кг (объем, м³) Mass, kg (volume, m³)
Кислород (O_2) Oxygen (O_2)	4 (2)
Воздух Air	17,24 (9,512)

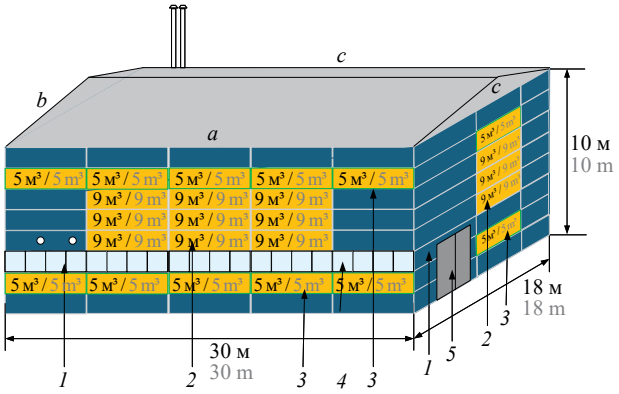


Рис. 19. Примерный план монтажа ЛСК и ЛССП в стеновых панелях промышленного здания: *1* — стеновая сэндвич-панель; *2* — легкосбрасываемая конструкция (ЛСК); *3* — легкосбрасываемая сэндвич-панель (ЛССП); *4* — оконный стеклопакет с усиленными изоляционными характеристиками; *5* — технические ворота

Fig. 19. Approximate plan of installation of LRS and LRSP in the wall panels of an industrial building: *1* — wall sandwich panel; *2* — lightweight removable structure (LRS); *3* — lightweight removable sandwich panel (LRSP); *4* — window glazing with reinforced insulation characteristics; *5* — technical gate

ЛСК и ЛССП следует сконцентрировать на фасадах здания — *a*, *b*, что составит 62 % от общей защиты здания 270 м^2.

Для защиты зданий небольших размеров ЛССП и ЛСК должны монтироваться в верхней части здания, так как при утечке или проливе метана ГПВС поднимается вверх, где образуется избыточное давление. Для определения силы избыточного давления при аварийном взрыве внутри производственного помещения требуется провести дополнительные исследования и натурные испытания и найти плотность образования облака ГПВС, величину избыточного давления, время образование огненного шара, параметры огненного шара, а также время и силу образования импульсов волн сжатия и разрежения.

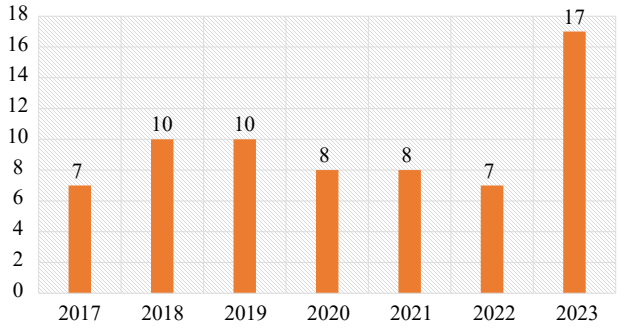


Рис. 20. Статистика взрывов на производственных предприятиях с 2017 по 2023 г

Fig. 20. Statistics of explosions at manufacturing plants from 2017 to 2023

В работе [44] авторы определили скорость дефлаграционного взрыва, образовавшегося на открытом пространстве без каких-либо влияний внешней среды, также авторы предоставляют сведения о высоте облака ГПВС. Следовательно, работы авторов применимы, но требуются дополнительные исследования с учетом влияния факторов окружающей среды климата Арктики.

Заключение

Статистика взрывов за последние годы (рис. 20) в период с 2017 по 2023 г. показывает рост их числа на опасных производственных объектах в России, с заметной стабилизацией в 2018–2021 гг. и резким скачком в 2023 г. (данные для статистики рис. 20 взяты из открытых источников интернет-ресурса). Это может свидетельствовать о нарастании проблем с безопасностью на производственных объектах, а также других факторах, которые способствовали увеличению числа происшествий в 2023 г.

Последствия взрывов показали, что в систему защиты здания и людей требуется внесение технологических и административных изменений, поэтому дальнейшее исследование с защитными функциями зданий будут продолжено. Вышеизложенное показывает, что проектная модель ЛССП является актуальной на сегодняшний день, требует дальнейшего исследования с проведением испытаний, так как важным исследованием по-прежнему остается защита производственных зданий от влияния избыточного давления и волновых явлений взрыва.

Подведем итог. Эффективность существующих ЛСК, применяемых для защиты зданий/сооружений, непосредственно зависит от факторов окружающей среды, соответственно, если требуется применение ЛСК в климатических погодных условиях, где температура окружающей среды больше 6 месяцев составляет ниже –35 °С, то, соответственно, ЛСК должны быть адаптированы для данных условий. Тем не менее функциональность существующих и применяемых на сегодняшний день ЛСК не оспаривается, и они эффективны в тех параметрах окружающей среды, в которых были исследованы.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. *Vijayan D.S., Sivasuriyan A., Patchamuthu P., Jayaseelan R.* Thermal performance of energy-efficient buildings for sustainable development // Environmental Science and Pollution Research. 2022. No. 29. Pp. 51130–51142. DOI: 10.1007/s11356-021-17602-3
2. Panel Plant in Detroit Koppers Plan // Pittsburgh Post-Gazette. May 6, 1959.

3. *Бэла Ляув.* Кирпич против панели // Коммерсантъ Дом. 2004. № 58. С. 26. URL: https://www.kommersant.ru/doc/460272?ysclid=m2 t5cjoxda630358174
4. Global Sandwich Panels Market Size, Share, Competitive Landscape and Trend Analysis Report by Product type. By Application, By End user: Global Opportunity Analysis and Industry Forecast, 2021–2031 // Engineering, Equipment And Machinery/Jul 2022/Report Code: A17020/Pages: 221/Tables: 93/Charts: 61. URL: https://www.researchandmarkets.com/reports/5846781/global-sandwich-panels-market-size-share-and
5. *Алисов Б.П.* Географические типы климатов // Метеорология и гидрология. 1936. № 6.
6. *Диппель И.В., Шабанов Е.А.* Технологические особенности быстровозводимых зданий из металлических конструкций // XIV Всеросс. науч.-практ. конф. молодых ученых «РОССИЯ МОЛОДАЯ». 19–22 апреля 2022 г.
7. *Кузнецов Д.Н., Емельянов Д.И., Павленко Т.М.* Силовая сэндвич-панель поэлементной сборки // Строительная механика и конструкции. 2020. № 1 (24). С. 70–84. EDN DEMPXQ.
8. *Pedro Andrade, Ove Lagerqvist, Rui Simões, Gabriel Sas*. On global and local buckling response of structural angle sandwich panels // Thin-Walled Structures. 2022. Vol. 180 (11). P. 109835. DOI: 10.1016/j.tws.2022.109835
9. *Liana Ostetto, Romain Sousa, Paulo Fernandes, Hugo Rodrigues.* Influence and effectiveness of horizontal diaphragms and cladding wall panels on the seismic behaviour of precast RC industrial buildings // Engineering Structures. 2023. Vol. 285. P. 116046. DOI: 10.1016/j.engstruct.2023.116046
10. *Tilak Prasad Sah, Andrew William Lacey, Hong Hao.* Prefabricated concrete sandwich and other lightweight wall panels for sustainable building construction : State-of-the-art review // Journal of Building Engineering. 2024. Vol. 89. P. 109391. DOI: 10.1016/j.jobe.2024.109391
11. *Behzad Fotovvati, Navid Namdari, Amir Dehghanghadikolaei.* On coating techniques for surface protection : a review // J. Manuf. Mater. Process. 2019. No. 3 (1). P. 28. DOI: 10.3390/jmmp3010028
12. *Erofeev V.I., Monich D.V.* Sound insulation properties of sandwich panels // 2020 IOP Conf. Ser. : Mater. Sci. Eng. 896 012005. DOI: 10.1088/1757-899X/896/1/012005
13. *Рожнятовский Г.И., Ванчугов И.М., Прокофьев В.А., Нуржиц С.И., Ишмурзин А.А.* Газоперерабатывающая отрасль России, анализ и перспективы ее развития // НефтеГазоХимия. Экономика и бизнес. 2020. № 2. С. 47–54. DOI: 10.24411/2310-8266-2020-10210. EDN GTGVLR.
14. *Сафонова Т.Ю.* Перспективы российской нефтегазодобычи в Арктике: от обвала до развития // Креативная экономика. 2020. Т. 14. № 10. С. 2569–2590. DOI: 10.18334/ce.14.10.111085
15. *Орлов Г.Г., Корольченко Д.А., Корольченко А.Я.* Экономическая оценка эффективности применения предохранительных конструкций для обеспечения взрывоустойчивости зданий и сооружений // Пожаровзрывобезопасность/Fire and Explosion Safety. 2015. Т. 24. № 6. С. 51–57. EDN UMHSHZ.
16. *Сарвут Т.О.* Принципы формирования среды обитания в Арктическом регионе // Вестник МГСУ. 2018. Т. 13. Вып. 2 (113). С. 130–140. DOI: 10.22227/1997-0935.2018.2.130-140. EDN YQCPRC.
17. *Голушков О.В., Комаров С.Л., Янович Д.Д.* Сэндвич-панели как альтернатива классическим строительным материалам и оценка их конкурентоспособности // Вестник Белорусско-Российского университета. 2015. № 3 (48). С. 127–134.
18. *Кодзоев М.-Б.Х., Исаченко С.Л.* Сэндвич-панель. Материалы и конструкции // Бюллетень науки и практики/Bulletin of Science and Practice. 2018. Т. 4. № 2. DOI: 10.5281/zenodo.1173216. EDN YOQMRM.
19. *Кобзев Д.О.* Сэндвич-панели с утеплителем в виде пенополиизоцианурата // Достижения науки и образования. 2018. URL: https://interactive-plus.ru/e-articles/444/Action444-466979.pdf
20. *Коканин С.В., Цыбакин С.В.* Исследование теплофизических свойств полистиролсодержащих пенопластов при их старении // Труды Костромской государственной сельскохозяйственной академии. Караваево : Костромская ГСХА, 2013. Вып. 78. С. 57–64.
21. *Mohammed Elamin, Bing Li, Tan K.T.* Impact damage of composite sandwich structures in arctic condition // Composite Structures. 2018. No. 192 (5). DOI: 10.1016/j.compstruct.2018.03.015
22. *Бобров Ю.Л., Овчаренко Е.Г., Шойхет Б.М., Петухова Е.Ю.* Теплоизоляционные материалы и конструкции : учеб. для средних профессионально-технических учебных заведений. М. : ИНФРА-М, 2003. 268 с.
23. *Мельников В.С., Кириллов С.В., Мельников М.В., Ванин С.А., Васильев В.Г., Потемкин С.А.* Минеральная вата — теплоизоляция фасадных и кровельных систем в условиях пожара пролива и тления // Интернет-журнал «Науковедение». 2016. Т. 8. № 6. URL: http://naukovedenie.ru/PDF/63TVN616.pdf
24. *El Mehdi Ablaoui, Michał Malendowski, Wojciech Szymkuc, Zbigniew Pozorsk.* Determination of thermal properties of mineral wool required for the safety analysis of sandwich panels subjected to fire loads // Materials. 2023. No. 16 (17). P. 5852. DOI: 10.3390/ma16175852
25. *Камчаткина В.М., Бузин Г.В.* Сравнение наиболее используемых утеплителей по теплофизическим и экономическим характеристикам // Матер. VII (XIII) Всеросс. науч.-технич. конф. студентов, магистрантов, аспирантов и молодых ученых : Молодая мысль: наука, технологии, инновации. 2015. EDN WWZUNH.
26. *Постовой А.А.* Анализ качества сэндвич-панелей для обеспечения пожарной безопасности зданий // Молодой исследователь Дона. 2021. № 6 (33). С. 77–82.

27. *Гуров А.А., Толмачева В.М.* Экструдированный пенополистирол и минеральная вата как теплоизоляционный материал // Сб. науч. ст. Всерос. науч.-практ. конф. молодых ученых, аспирантов, магистров и бакалавров. Курск, 2023. С. 200–203. EDN GODMPE.
28. *Мельников В.С., Кириллов С.В., Мельников М.В., Васильев В.Г., Ванин С.А., Потемкин С.А.* Пожарно-структурная экспертиза повреждений теплоизоляционных материалов из минеральной ваты и пенополиизоцианурата // Интернет-журнал «Науковедение». 2016. Т. 8. № 3 (34). С. 129.
29. *Кузьмин В.А.* Исследование возможностей применения отражательной теплоизоляции в многослойных сэндвич-панелях с учетом многократного отражения // Строительные материалы. 2017. № 6. С. 35–40.
30. *Подгорецкий Ю.Ю.* Исследование надежности срабатывания легкосбрасываемых конструкций на основе сотовых поликарбонатных листов // The Scientific Heritage. 2020. № 50. С. 45–50.
31. *Ulaeto S.B., Ravi R.P., Udoh I.I., Mathew G.M., Rajan T.P.D.* Polymer-based coating for steel protection, highlighting metal–organic framework as functional actives // A Review. Corros. Mater. Degrad. 2023. No. 4. Pp. 284–316. DOI: 10.3390/cmd4020015
32. *Джавет С.* Особенности быстровозводимых зданий промышленного назначения // Мировая наука. 2023. № 3 (72). С. 100–104. EDN BLXLXH
33. *Самарин О.Д., Горюнов И.И., Тещенкова И.И.* Влияние конструктивных характеристик помещений на параметры регуляторов автоматизированных климатических систем // Вестник МГСУ. 2015. № 2. С. 101–109. EDN TIVXVR.
34. *Поландов Ю.Х., Добриков С.А., Кукин Д.А.* Результаты испытаний легкосбрасываемых конструкций // Пожаровзрывобезопасность/Fire and Explosion Safety. 2017. Т. 26. № 8. С. 5–14. DOI: 10.18322/PVB.2017.26.08.5-14. EDN SAWFEZ.
35. *Горев В.А., Салымова Е.Ю.* Использование сэндвич-панелей в качестве легкосбрасываемых конструкций при внутренних взрывах в промышленных зданиях // Пожаровзрывобезопасность/Fire and Explosion Safety. 2010. Т. 19. № 2. С. 41–44.
36. *Скориков Б., Стромилов Н., Будько О., Рождественский А., Рогальская Т.* Использование сэндвич-панелей в качестве ЛСК при техническом перевооружении ОПО // Регламент. 2015. № 6 (44). С. 42–43. EDN WBFLNR.
37. *Комаров А.А.* Разрушение зданий при аварийных взрывах бытового газа // Пожаровзрывобезопасность/Fire and Explosion Safety. 2004. № 5. С. 15–23. EDN PMDPUJ.
38. *Орлов Г.Г., Корольченко Д.А., Корольченко А.Я.* Определение величины и характера взрывных нагрузок при применении инерционных предохранительных конструкций // Пожаровзрывобезопасность/Fire and Explosion Safety. 2015. Т. 24. № 4. С. 47–55. EDN TVFFSB.
39. *Корольченко О.Н., Корольченко А.Д.* Определение давления вскрытия легкосбрасываемых конструкций с учетом ветровых нагрузок // Вестник МГСУ. 2022. Т. 17. Вып. 7. С. 914–921. DOI: 10.22227/1997-0935.2022.7.914-921. EDN FFITIF.
40. *Corcoran D., Climstein M., Whitting J., Del Vecchio L.* Impact Force and Velocities for Kicking Strikes in Combat Sports : a Literature Review // Sports. 2024. No. 12 (74). Pp. 1–17. DOI: 10.3390/sports12030074
41. *Youngcheol Kang, Sohaib Siddiqui, Sung Joon Suk, Seokho Chi, Changwan Kim.* Trends of Fall Accidents in the U.S. Construction Industry // Journal of Construction Engineering and Management. 2017. Vol. 143. Issue 8. DOI: 10.1061/(ASCE)CO.1943-7862.000133
42. *Bunev V.A., Korzhavin A.A., Senachin P.K.* Analysis of the influence of various factors on the characteristics of methane explosion hazard // International Journal of Corrosion. 2012. No. 3/1. DOI: 10.1155/2018/1258379. EDN YBZXUT.
43. *Мишуев А.В., Хуснутдинов Д.З.* Методика расчета нагрузок на здания и сооружения при воздействии внешних аварийных дефлаграционных взрывов. М. : МГСУ, 2004. 65 с.
44. *Комаров А.А., Грохотов М.А.* Определение скорости распространения фронта пламени при аварийных дефлаграционных взрывах // Безопасность труда в промышленности. 2020. № 7. С. 7–13. DOI: 10.24000/0409-2961-2020-7-7-13. EDN NWGKIV.

REFERENCES

1. Vijayan D.S., Sivasuriyan A., Patchamuthu P., Jayaseelan R. Thermal performance of energy-efficient buildings for sustainable development. *Environmental Science and Pollution Research*. 2022; 29:51130-51142. DOI: 10.1007/s11356-021-17602-3
2. Panel plant in Detroit Koppers plan. *Pittsburgh Post-Gazette*. May 6, 1959.
3. Bela Liauw. Brick vs. panel. *Kommersant Home.* 2004; 58:26. URL: https://www.kommersant.ru/doc/460272?ysclid=m2 t5cjoxda630358174 (rus).
4. Global Sandwich Panels Market Size, Share, Competitive landscape and trend analysis report by product type, by application, by end user: Global Opportunity Analysis and Industry Forecast, 2021–2031. *Engineering, Equipment And Machinery/Jul 2022/Report Code: A17020/Pages: 221/Tables: 93/Charts: 61*. URL: https://www.researchandmarkets.com/reports/5846781/global-sandwich-panels-market-size-share-and

5. Alisov B.P. Geographical types of climates. *Meteorology and Hydrology.* 1936:6. (rus).
6. Dippel I.V., Shabanov E.A. Technological features of fast-erected buildings from metal structures. *XIV All-Russian Scientific and Practical Conference of Young Scientists RUSSIA YOUNG*. 19–22 April 2022. (rus).
7. Kuznetsov D.N., Emelyanov D.I., Pavlenko T.M. Power sandwich-panel of the element-by-element assembly. *Building Mechanics and Structures*. 2020; 1(24):70-84. EDN DEMPXQ. (rus).
8. Pedro Andrade, Ove Lagerqvist, Rui Simões, Gabriel Sas. On global and local buckling response of structural angle sandwich panels. *Thin-Walled Structures.* 2022; 180(11):109835. DOI: 10.1016/j.tws.2022.109835
9. Liana Ostetto, Romain Sousa, Paulo Fernandes, Hugo Rodrigues. Influence and effectiveness of horizontal diaphragms and cladding wall panels on the seismic behaviour of precast RC industrial buildings. *Engineering Structures*. 2023; 285:116046. DOI: 10.1016/j.engstruct.2023.116046
10. Tilak Prasad Sah, Andrew William Lacey, Hong Hao. Prefabricated concrete sandwich and other lightweight wall panels for sustainable building construction: state-of-the-art review. *Journal of Building Engineering.* 2024; 89:109391. DOI: 10.1016/j.jobe.2024.109391
11. Behzad Fotovvati, Navid Namdari, Amir Dehghanghadikolaei. On Coating Techniques for Surface Protection : a Review. *J. Manuf. Mater. Process.* 2019; 3(1):28. DOI: 10.3390/jmmp3010028
12. Erofeev V.I., Monich D.V. Sound insulation properties of sandwich panels. *2020 IOP Conf. Ser. : Mater. Sci. Eng. 896 012005*. DOI: 10.1088/1757-899X/896/1/012005
13. Rozhnyatovsky G.I., Vanchugov I.M., Prokofiev V.A., Nurzhits S.I., Ishmurzin A.A. Gas processing industry of Russia, analysis and prospects of its development. *NefteGazokhimiya. Economics and Business.* 2020; 47-54. DOI: 10.24411/2310-8266-2020-10210. EDN GTGVLR. (rus).
14. Safonova T.Yu. Prospects of Russian oil and gas production in the Arctic: from collapse to development. *Creative Economy*. 2020; 14(10):2569-2590. DOI: 10.18334/ce.14.10.111085 (rus).
15. Orlov G.G., Korolchenko D.A., Korolchenko A.Ya. Economic evaluation of the effectiveness of safety structures to ensure explosion resistance of buildings and structures. *Pozharovzryvzryvobezopasnost/Fire and explosion safety.* 2015; 24(6):51-57. EDN UMHSHZ. (rus).
16. Sarvut T.O. Principles of habitat formation in the Arctic region. *MGSU Bulletin*. 2018; 13(2):130-140. DOI: 10.22227/1997-0935.2018.2.130-140. EDN YQCPRC. (rus).
17. Golushkov O.V., Komarov S.L., Yanovich D.D. Sandwich-panels as an alternative to classical building materials and assessment of their competitiveness. *Bulletin of Belarusian-Russian University.* 2015; 3(48):127-134. (rus).
18. Kodzoev M.-B.H., Isachenko S.L. Sandwich-panel. Materials and constructions. *Bulletin of Science and Practice – Bulletin of Science and Practice scientific journal*. 2018; 4(2):224-227. DOI: 10.5281/zenodo.1173216. EDN YOQMRM. (rus).
19. Kobzev D.O. Sandwich-panels with insulation in the form of polyisocyanurate foam. *Journal of Science and Education Achievements*. 2018. URL: https://interactive-plus.ru/e-articles/444/Action444-466979.pdf (rus).
20. Kokanin S.V., Tsybakin S.V. Investigation of thermophysical properties of polystyrene-containing foams at their ageing. *Proceedings of the Kostroma State Agricultural Academy.* Karavaevo, Kostroma State Agricultural Academy, 2013; 78:57-64.
21. Mohammed Elamin, Bing Li, Tan K.T. Impact damage of composite sandwich structures in arctic condition. *Composite Structures.* 2018; 192(5). DOI: 10.1016/j.compstruct.2018.03.015
22. Bobrov Yu.L., Ovcharenko E.G., Shoikhet B.M., Petukhova E.Yu. *Thermal insulation materials and structures* : *textbook for secondary vocational and technical educational institutions.* Moscow, INFRA-M, 2003; 268. (rus).
23. Melnikov V.S., Kirillov S.V., Melnikov M.V., Vanin S.A., Vasiliev V.G., Potemkin S.A. Mineral wool — thermal insulation of facade and roofing systems under conditions of spill and smoldering fire. *Internet journal "Naukovedenie"*. 2016; 8(6). URL: http://naukovedenie.ru/PDF/63TVN616.pdf (rus).
24. El Mehdi Ablaoui, Michał Malendowski, Wojciech Szymkuc, Zbigniew Pozorsk. Determination of thermal properties of mineral wool required for the safety analysis of sandwich panels subjected to fire loads. *Materials*. 2023; 16(17):5852. DOI: 10.3390/ma16175852
25. Kamchatkatina V.M., Buzin G.V. Comparison of the most used insulation materials by thermophysical and economic characteristics. *Young thought : science, technology, innovation. Proceedings of the VII (XIII) All-Russian scientific and technical conference of students, masters, postgraduates and young scientists*. 2015. EDN WWZUNH. (rus).
26. Postovoy A.A. Analysing the quality of sandwich panels to ensure fire safety of buildings. *Young researcher Don.* 2021; 6(33):77-82. (rus).
27. Gurov A.A., Tolmacheva V.M. *Extruded polystyrene foam and mineral wool as a heat-insulating material : collection of scientific articles of the All-Russian scientific and practical conference of young scientists, postgraduates, masters and bachelors.* Kursk, 2023; 200-203. EDN GODMPE.
28. Melnikov V.S., Kirillov S.V., Melnikov M.V., Vasiliev V.G., Vanin S.A., Potemkin S.A. Fire-structural examination of the damage of thermal insulation materials made of mineral wool and polyisocyanurate foam. *Internet Journal "Naukovedenie"*. 2016; 8(3):129.
29. Kuzmin V.A. Investigation of the possibilities of using reflective thermal insulation in multilayer sandwich panels taking into account multiple reflection. *Construction Materials*. 2017; 6:35-40. (rus).

30. Podgoretsky Yu.Yu. Study of the reliability of operation of easily resettable structures based on cellular polycarbonate sheets. *The Scientific Heritage*. 2020; 50:45-50. (rus).
31. Ulaeto S.B., Ravi R.P., Udoh I.I., Mathew G.M., Rajan T.P.D. Polymer-based coating for steel protection, highlighting metal–organic framework as functional actives. *A Review. Corros. Mater. Degrad.* 2023; 4:284-316. DOI: 10.3390/cmd4020015
32. Javet S. Features of prefabricated industrial buildings. *World Science.* 2023; 3(72):100-104. EDN BLXLXH. (rus).
33. Samarin O.D., Goryunov I.I., Teschenkova I.I. Influence of design characteristics of premises on the parameters of regulators of automated climate control systems. *Bulletin of MGSU.* 2015; 2:101-109. EDN TIVXVR.
34. Polandov Y.Kh., Dobrikov S.A., Kukin D.A. Test results of the lightly thrown structures. *Pozharovzryvobezopasnost/Fire and Explosion Safety*. 2017; 26(8):5-14. DOI: 10.18322/PVB.2017.26.08.5-14. EDN SAWFEZ (rus).
35. Gorev V.A., Salymova E.Y. Use of sandwich-panels as easily resettable structures in internal explosions in industrial buildings. *Pozharovzryvzryvobezopasnost/Fire and Explosion Safety.* 2010; 19(2):41-44. (rus).
36. Skorikov B., Stromilov N., Budko O., Rozhdestvensky A., Rogalskaya T. Use of sandwich panels as LSC during technical re-equipment of OPO. *Reglament.* 2015; 6 (44):42-43. EDN WBFLNR. (rus).
37. Komarov A.A. Destruction of buildings during emergency explosions of household gas. *Pozharovzryvzryvobezopasnost/Fire and Explosion Safety.* 2004; 5:15-23. EDN PMDPUJ. (rus).
38. Orlov G.G., Korolchenko D.A., Korolchenko A.Ya. Determination of Magnitude and Character of Explosive Loads at Application of Inertial Safety Structures. *Pozharovzryvzryvobezasnost'/Fire and Explosion Safety*. 2015; 24(4):47-55. EDN TVFFSB. (rus).
39. Korolchenko O.N., Korolchenko A.D. Determination of the opening pressure of lightly thrown structures taking into account wind loads. *Vestnik MSCU.* 2022; 17(7):914-921. DOI: 10.22227/1997-0935.2022.7.914-921. EDN FFITIF. (rus).
40. Corcoran D., Climstein M., Whitting J., Del Vecchio L. Impact Force and Velocities for Kicking Strikes in Combat Sports : a Literature Review. *Sports.* 2024; 12(74):1-17. DOI: 10.3390/sports12030074
41. Youngcheol Kang, Sohaib Siddiqui, Sung Joon Suk, Seokho Chi, Changwan Kim. Trends of Fall Accidents in the U.S. Construction Industry. *Journal of Construction Engineering and Management.* 2017; 143(8). DOI: 10.1061/(ASCE)CO.1943-7862.000133
42. Bunev V.A., Korzhavin A.A., Senachin P.K. Analysis of the influence of various factors on the characteristics of methane explosion hazard. *International Journal of Corrosion.* 2012; 3(1):5-16. DOI: 10.1155/2018/1258379. EDN YBZXUT. (rus).
43. Mishuev A.V., Khusnutdinov D.Z. *Methodology for calculating loads on buildings and structures under the influence of external emergency deflagration explosions*. Moscow, MGSU, 2004; 65. (rus).
44. Komarov A.A., Grokhotov M.A. Determination of the flame front propagation velocity in emergency deflagration explosions. *Labour Safety in Industry.* 2020; 7:7-13. DOI: 10.24000/0409-2961-2020-7-7-13. EDN NWGKIV. (rus).

Поступила 24.07.2024, после доработки 15.09.2024;
принята к публикации 18.09.2024
Received July 24, 2024; Received in revised form September 15, 2024;
Accepted September 18, 2024

Информация об авторах

РАССКАЗОВ Евгений Степанович, аспирант, руководитель отдела охраны труда, промышленной безопасности и экологии, АО «Песко Энергия и Ресурсы», Россия, 123112, г. Москва, Пресненская наб., 12, оф. 2/91; ORCID: 0009-0008-7929-0712; e-mail: evgenyples@hotmail.com

КОРОЛЬЧЕНКО Дмитрий Александрович, д.т.н., доцент, заведующий кафедрой комплексной безопасности в строительстве, Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет, Россия, 129337, г. Москва, Ярославское шоссе, 26; РИНЦ ID: 352067; Scopus AuthorID: 55946060600; ResearcherID: E-1862-2017; e-mail: KorolchenkoDA@mgsu.ru

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

Information about the authors

Evgenii S. RASSKAZOV, Postgraduate student, Head of the Department of Occupational Health, Safety and Environment, JSC "PESCO Energy & Resources", Presnenskaya nab., 12, Moscow, 123112, Russian Federation; ORCID: 0009-0008-7929-0712; e-mail: evgenyples@hotmail.com

Dmitriy A. KOROLCHENKO, Dr. Sci. (Eng.), Associate Professor, Head of the Department of Integrated Safety in Construction, Moscow State University of Civil Engineering (National Research University), Yaroslavskoe Shosse, 26, Moscow, 129337, Russian Federation; e-mail: KorolchenkoDA@mgsu.ru

Contribution of the authors: *the authors contributed equally to this article.*
The authors declare no conflict of interest.

ПОЖАРОВЗРЫВОБЕЗОПАСНОСТЬ/FIRE AND EXPLOSION SAFETY. 2024. Т. 33. № 5. С. 51–60
POZHAROVZRYVOBEZOPASNOST/FIRE AND EXPLOSION SAFETY. 2024; 33(5):51-60

НАУЧНАЯ СТАТЬЯ/RESEARCH PAPER

УДК 614.838, 614.839

https://doi.org/10.22227/0869-7493.2024.33.05.51-60

Общие принципы защиты объектов от беспилотных летательных аппаратов

Александр Андреевич Комаров ✉, Николай Викторович Громов, Антон Дмитриевич Корольченко, Павел Сергеевич Ланской

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

АННОТАЦИЯ

Введение. С началом специальной военной операции беспилотные летательные аппараты (БПЛА) используются для нанесения ударов по промышленным, транспортным, энергетическим и гражданским объектам. В настоящее время активно применяется физический метод защиты таких объектов — установка защитных ограждающих конструкций (ЗОК) на основе сетчатых ограждений. Их функция заключается в предотвращении контакта БПЛА и переносимого им заряда с защищаемым объектом.
Методы исследования. В настоящей статье задача по оценке минимальных расстояний от сетчатого экрана до защищаемого объекта была решена с использованием расчетных методов, основанных на эмпирических соотношениях М.А. Садовского.
Цель. Оценка эффективности устройства ЗОК для защиты зданий и сооружений от ВУВ и оценки возможности конструирования и реализации ЗОК на практике.
Задачи. Определение минимального расстояния от элементов, препятствующих контакту заряда, переносимого БПЛА, с защищаемым объектом; анализ возможности технической реализации ЗОК с рассчитанными параметрами.
Результаты. В результате расчетов были получены значения минимальных расстояний от сетчатого ограждения ЗОК до защищаемого объекта при зарядах различной массы.
Выводы. Анализ результатов показал, что применение ЗОК является эффективным способом защиты зданий и сооружений от атак БПЛА. Существующие конструктивные решения и материалы ЗОК позволяют реализовать приемлемую безопасность объектов от атак БПЛА.

Ключевые слова: беспилотный летательный аппарат; воздушная ударная волна; защитная ограждающая конструкция; сетчатое ограждение

Благодарности. Данная работа была реализована в рамках программы развития передовой инженерно-строительной школы НИУ МГСУ.

Для цитирования: *Комаров А.А., Громов Н.В., Корольченко А.Д., Ланской П.С.* Общие принципы защиты объектов от беспилотных летательных аппаратов // Пожаровзрывобезопасность/Fire and Explosion Safety. 2024. Т. 33. № 5. С. 51–60. DOI: 10.22227/0869-7493.2024.33.05.51-60

✉ *Комаров Александр Андреевич*, e-mail: KomarovAA@mgsu.ru

Protection of objects from unmanned aerial vehicles

Alexander A. Komarov ✉, Nikolai V. Gromov, Anton D. Korolchenko, Pavel S. Lanskoy

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

ABSTRACT

Introduction. Since the beginning of a special military operation, unmanned aerial vehicles (UAV) have been used to strike industrial, transport, energy and civilian facilities. Currently, a physical method of protecting such objects is actively used — the installation of protective enclosing structures (PES) based on mesh fences. Their function is to prevent the UAV and the charge it carries from contacting the protected object.
Research methods. The main damaging factor in the attack of the UAV is the effect of an air shock wave from the explosion of a charge (munition) on the enclosing structures of buildings and structures. The intensity of the explosive charge at short distances from the charge decreases in proportion to the distance to the third degree, therefore, it is relevant to solve the problem of estimating the minimum distances from the mesh screen to the protected object. In this paper, this problem was solved using computational methods based on empirical relations of M.A. Sadovsky.
Aim. To evaluate the effectiveness of the PES for the protection of buildings and structures from an air shock wave and to assess the possibility of designing and realization of PES in practice.
Objectives. Determination of the minimum distance from the elements preventing the contact of the charge carried by the UAV with the protected object; analysis of the possibility of technical implementation of the PES with the calculated parameters.

© А.А. Комаров, Н.В. Громов, А.Д. Корольченко, П.С. Ланской, 2024

Calculation results. As a result of calculations, the values of the minimum distances from the mesh fence of the PES to the protected object were obtained with charges of different masses.
Conclusions. The analysis of the results showed that the use of PES is an effective way to protect buildings and structures from UAV attacks. The existing design solutions and materials of the PES make it possible to implement acceptable security of objects from UAV attacks.

Keywords: unmanned aerial vehicle; air shock wave; protective fencing structure; mesh fence

Acknowledgments. The research was funded by Moscow State University of Civil Engineering (National Research University), (MGSU Advanced Civil Engineering School development programme).

For citation: Komarov A.A., Gromov N.V., Korolchenko D.A., Lanskoy P.S. Protection of objects from unmanned aerial vehicles. *Pozharovzryvobezopasnost/Fire and Explosion Safety*. 2024; 33(5):51-60. DOI: 10.22227/0869-7493.2024.33.05.51-60 (rus).

✉ *Alexander Andreevich Komarov*, e-mail: KomarovAA@mgsu.ru

Введение

Современные методы ведения боевых действий внедрили в практику применение одного из наиболее эффективных способов поражения целей противника — использование беспилотных летательных аппаратов (БПЛА), снаряженных зарядом взрывчатого вещества (ВВ) [1, 2]. По сравнению с консервативными средствами поражения (ракеты, снаряды, бомбы) и пилотируемыми летательными аппаратами, БПЛА обладает рядом преимуществ: относительно низкая стоимость (особенно для FPV-дронов), высокая живучесть и возможность создания малозаметных машин, которые смогут обладать высокой маневренностью [3, 4].

С началом специальной военной операции (СВО) беспилотные летательные аппараты все чаще применяются для атак на российские гражданские, промышленные, энергетические и транспортные объекты, расположенные вне зоны боевых действий: хранилища нефти и нефтепродуктов, трансформаторные подстанции, производственные здания, аэродромы и автовокзалы. Такая тенденция может сохраниться и после окончания СВО в связи с высоким уровнем потенциальной террористической угрозы.

В настоящее время существует несколько основных способов защиты от БПЛА: применение средств ПВО, радиоэлектронная защита, оптическая блокировка и физическая защита [5, 6]. Наиболее простым в изготовлении и эксплуатации методом защиты является физическая защита от дронов в виде защитных ограждающих конструкций (ЗОК). Такие системы уже предлагаются на рынке, описаны в научных изданиях [7, 8] и используются для защиты ведомственных и отраслевых объектов, однако в настоящее их конструктивные особенности не обоснованы с научной точки зрения. Они не учитывают особенности защищаемого объекта, скорость БПЛА при ударе, массу переносимого заряда ВВ. Нет информации об испытаниях подобных конструкций, как, впрочем, и методики их испытаний на воздействие удара и взрыва.

Анализ открытых источников[1, 2], в которых указаны основные объекты атаки БПЛА и их технические характеристики, позволил разработать классификацию ЗОК по некоторым конструктивным особенностям и применяемым для их изготовления материалам. По расположению относительно защищаемого объекта ЗОК классифицируются по следующим типам:

- на независимой опорной конструкции (рис. 1);
- на зависимой опорной конструкции (рис. 2).

По типу инженерных сооружений:

- капитальные сооружения;
- быстровозводимые сооружения (временные конструкции).

По типу элементов, препятствующих контакту БПЛА с защищаемым объектом:

- на основе стальных канатов;
- металлических сеток;
- полимерных сеток;
- ж/б и габионных конструкций;

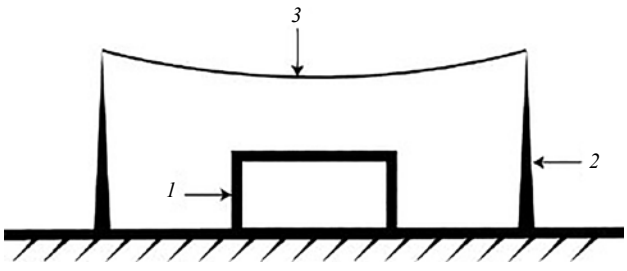


Рис. 1. Схема ЗОК на независимой опорной конструкции (без опоры на защищаемый объект): *1* — защищаемое сооружение; *2* — независимая опорная конструкция; *3* — защитная сетка

Fig. 1. Diagram of a protective enclosing structure on an independent support structure (without support on the protected object): *1* — protected structure; *2* — independent support structure; *3* — safety net

[1] Электронная библиотека «Арсенал-Инфо». URL: http://arsenal-info.ru/

[2] Skylogic Reseach Drone Analyst — UAS/UAV Advisors (исследования и аналитика в области дронов компании Skylogic). URL: http://droneanalyst.com/

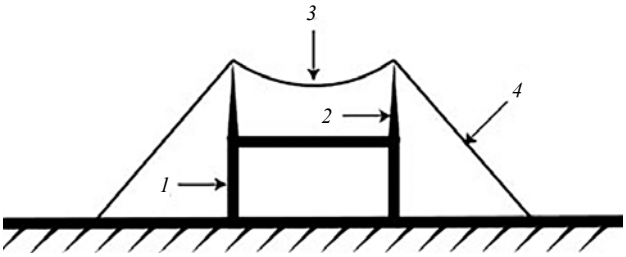


Рис. 2. Схема ЗОК на зависимой опорной конструкции (с опорой на защищаемый объект): *1* — защищаемое сооружение; *2* — зависимая опорная конструкция; *3* — защитная сетка; *4* — растяжка

Fig. 2. Diagram of a protective enclosing structure on a dependent support structure (based on the protected object): *1* — protected structure; *2* — dependent support structure; *3* — protective mesh; *4* — stretching

- комбинированные.

В настоящее время широкое распространение получили ЗОК на основе улавливающих сетчатых конструкций и стальных канатов [9, 10]. Такие конструкции должны обладать рядом функциональных характеристик:

- обеспечить реализацию бесконтактного (по отношению к защищаемому объекту) взрыва ВВ с заданной вероятностью не разрушения здания или сооружения путем предотвращения подлета БПЛА к защищаемому объекту;
- предотвратить поражение защищаемого объекта и людей, находящихся внутри него, осколками или поражающими элементами заряда;
- обеспечить защиту объекта от воздействия контактного взрыва с недопущением обратного откола элементов ЗОК (бетонных блоков, кирпичных стен).

Основным поражающим фактором, приводящим к разрушению защищаемого здания или сооружения при атаке БПЛА, является воздушная ударная волна (ВУВ), которая образуется в результате взрыва заряда, переносимого дроном.

С целью оценки эффективности устройства ЗОК для защиты зданий и сооружений от ВУВ и оценки возможности конструирования и реализации ЗОК на практике актуальным является решение **задачи** по определению минимального расстояния от элементов, препятствующих контакту заряда, переносимого БПЛА, с защищаемым объектом. В качестве таких элементов наиболее часто используются сетчатые ограждения, расположенные на несущем каркасе.

Для достижения поставленной цели в настоящей статье приведено решение задачи по определению минимальных расстояний от сетчатых ограждений до защищаемого объекта и оценке эффективности ЗОК на основе сетчатых конструкций.

Методы

Соотношения, используемые для расчета минимальных расстояний от сетчатого ограждения до защищаемого объекта

Для определения минимального расстояния от сетчатого ограждения до границы защищаемого объекта необходимо в качестве начального условия принять максимальную массу переносимого летательным аппаратом заряда, приведенную к массе тротила (ТНТ). Минимальное расстояние от заряда до границы защищаемого объекта определяется исходя из разрушающей способности, создаваемой ВУВ, которая возникает при подрыве заряда заданной массы.

Возможность значительного ослабления поражающей способности заряда при достаточно незначительном удалении от него вытекает из следующей особенности детонационных взрывов конденсированных взрывчатых веществ (ВВ). Давление в детонационной волне пропорционально плотности ВВ и квадрату скорости детонации. Поэтому конденсированные ВВ, которые отличаются большой плотностью и высокой скоростью детонации, обладают сильным бризантным (дробящим) действием. Например, при взрыве ТНТ (тротила), имеющего плотность, равную 1600 кг/м^3, и скорость детонации 7000 м/с, давление взрыва составляет около 20 000 000 кПа. При взрывах конденсированных ВВ на грунте всегда образуется воронка взрыва, а от границы заряда уходит воздушная ударная волна (ВУВ) с очень высоким давлением, интенсивность которой резко падает с удалением от заряда. Поэтому, несмотря на высокие поражающие свойства конденсированных взрывчатых веществ в непосредственной близости от них, их эффективность или поражающие свойства резко падают с удалением от заряда. Интенсивность ВУВ, являющейся основным поражающим фактором при взрыве ВВ, на ближних расстояниях от заряда уменьшается пропорционально расстоянию в третьей степени.

Методы определения параметров ВУВ при взрывах ВВ описаны во многих источниках (например, [11, 12] и др.), в которых избыточное давление во фронте ВУВ определяется по эмпирическим формулам, имеющим структуру формулы М.А. Садовского [11]:

$$\Delta P_F = \frac{A}{\overline{R}} + \frac{B}{\overline{R}^2} + \frac{D}{\overline{R}^3}, \text{ кПа}, \qquad (1)$$

где A, B и D — эмпирические коэффициенты;

$\overline{R}$ — приведенное расстояние до центра взрыва, определяемое по формуле:

$$\overline{R} = \frac{R}{\sqrt[3]{K \cdot M \cdot Z}}, \text{ м/кг}^{1/3}, \qquad (2)$$

где K — коэффициент эффективности заряда ВВ по образованию ВУВ, применительно к нашим расчетам принимается, что $K = 1$;

M — масса заряда, кг;

Z — коэффициент, учитывающий отношение теплоты взрывчатого превращения ВВ к теплоте взрывчатого превращения тротила (ТНТ).

Значения коэффициента Z для некоторых видов ВВ приведены в табл. 1.

Ниже коротко описана используемая авторами методика, которая построена на основе эмпирической формулы М.А. Садовского, с некоторыми уточнениями и дополнениями.

Избыточное давление во фронте ВУВ определяется по формуле:

$$P = \frac{1}{\bar{R}}\left[82{,}4 + \frac{1}{\bar{R}}\left(265 + \frac{1}{\bar{R}}687\right)\right], \text{ кПа}. \quad (3)$$

Закон изменения избыточного давления во времени определяется:

$$\Delta P(t) = P \cdot \left(1 - \frac{t}{\tau_+}\right)^n, \text{ кПа}, \quad (4)$$

где τ_+ — длительность положительной фазы, определяемая как:

$$\tau_+ = \bar{\tau}_+ \sqrt[3]{K \cdot M}, \quad (5)$$

где $\bar{\tau}_+$ — приведенное время длительности положительной фазы ВУВ:

$$\bar{\tau}_+ = 1{,}5 \cdot 10^{-3} \sqrt{\bar{R}}, \text{ с/кг}^{1/3}, \quad (6)$$

Таблица 1. Значение Z для некоторых видов ВВ [13, 14]
Table 1. The Z value for some types of explosives [13, 14]

Виды ВВ Types of explosives	Z	Виды ВВ Types of explosives	Z
Тротил TNT	1	Тринитроанилин Trinitroaniline	0,981
Динитробензол Dinitrobenzene	0,86	Пикрат аммония Ammonium picrate	0,792
Тринитробензол Trinitrobenzene	1,066	Аммонийная селитра Ammonium nitrate	0,396
Октоген Octogen	1,278	Аммотол 80/20 Ammotol 80/20	0,991
Тэн Penthrite	1,378	Пироксилин Pyroxylin	1,03
Дымный порох Smoke unpowder	0,658	Гексоген Hexogen	1,306
Тринитро-хлорбензол Trinitrochloro-benzene	1	Оксиликвиты (поглотители) Oxyliquites (absorbents)	0,991

где n — показатель спада избыточного давления, вычисляемый по зависимости:

$$n = 1 + \left(\frac{\Delta P_F}{P_0}\right)^{\gamma}, \quad (7)$$

где γ — показатель степени, равный (при $5 \le \Delta P_F \le 1000$ кПа):

$$\gamma = \begin{cases} 0{,}6 & \Delta P_F > P_0, \\ 0{,}4 & \Delta P_F < P_0, \end{cases} \quad (8)$$

где P_0 — атмосферное давление ($P_0 = 101{,}3$ кПа).

Из приведенных выше соотношений следует, что критерием подобия при детонационных взрывах ВВ является приведенное расстояние до центра взрыва, определяемое по формуле (2).

Импульс положительной фазы сжатия ВУВ, создаваемой взрывом ВВ, определяется по выражению:

$$I = \frac{P \cdot \tau_+}{n+1}. \quad (9)$$

Разрушающая способность воздушной ударной волны, которая возникает при детонационном взрыве ВВ, зависит от интенсивности ВУВ и импульса положительной фазы сжатия [15, 16][3, 4].

Вероятность средних разрушений типовых промышленных зданий определяется по величине пробит-функции [17, 18]:

$$\Pr_1 = 5 - 0{,}26 \ln V_1, \quad (10)$$

где $V_1 = \left(\frac{17\,500}{P}\right)^{8{,}4} + \left(\frac{260}{I}\right)^{9{,}3}$; P задано в Па, а I задается в Па·с.

Вероятность полных разрушений типовых промышленных зданий определяется по величине пробит-функции [17, 18]:

$$\Pr_2 = 5 - 0{,}22 \ln V_2, \quad (11)$$

где $V_2 = \left(\frac{40\,000}{P}\right)^{7{,}4} + \left(\frac{460}{I}\right)^{11{,}3}$; P задано в Па, а I задается в Па·с.

Для полученных значений пробит-функций $\Pr_1$ и $\Pr_2$ находятся вероятности реализации данных событий.

Располагая данными о вероятностях разрушений типовых промышленных зданий, которые реализуются на определенных расстояниях от заряда,

[3] Методика оценки последствий аварийных взрывов топливно-воздушных смесей (РД 03-409–01). Сборник документов Госгортехнадзор России, НТЦ «Промышленная безопасность», серия 27, выпуск 2. М., 2001. 224 с.

[4] ГОСТ Р 12.3.047–2012. ССБТ «Пожарная безопасность технологических процессов». М. : Госстандарт России. 61 с.

назначаются минимальные расстояния установки сетчатых экранов от границы защищаемого объекта.

Результаты расчетов

Расчет минимального расстояния от границы защищаемого объекта, на котором должно располагаться ограждение без учета его прогиба

Для определения параметров сетчатого ограждения и расстояний от ограждения до границы защищаемого объекта необходимо в качестве начальных условий принять максимальные характеристики БПЛА (габариты, вес и скорость БПЛА), а также максимальную массу переносимого аппаратом заряда, приведенную к массе ТНТ.

Анализ имеющейся информации по БПЛА[5, 6] показывает, что в качестве возможного заряда, который способен нести летательный аппарат, следует принять три возможных варианта: малый БПЛА с массой заряда $M = 2$ кг[7] [19] (вариант защиты 1); средний БПЛА с массой заряда $M = 10$ кг[8] [20] (вариант защиты 2) и большой БПЛА с массой заряда $M = 50$ кг [21, 22] (вариант защиты 3).

Применительно к указанным массам зарядов на рис. 3–11 приведены параметры воздушной ударной волны (ВУВ), генерируемой при их детонации, и условные вероятности разрушений, создаваемые данными ВУВ.

На рис. 3 приведена временная зависимость ВУВ, генерируемой зарядом ТНТ с массой $M = 2$ кг, на расстоянии $R = 4$ м от заряда.

Воздушная ударная волна имеет следующие интегральные характеристики: максимальное давление в ВУВ $P_{max} = 73{,}7$ кПа; минимальное давление в волне разрежения $P_{min} = -10{,}1$ кПа; импульс положительной фазы давления $I = 86{,}2$ Па·с; T_F — время действия фазы сжатия, приведенной к треугольной форме: $T_F = (2 \cdot I)/P_{max} = 2{,}34$ мс; давление отражения ВУВ от вертикальной преграды составляет $P_{otr} = 189{,}1$ кПа.

На рис. 4 приведены зависимости от расстояния R до места взрыва максимального давления в ВУВ и давления отражения ВУВ от вертикальной преграды, генерируемой зарядом ТНТ с массой $M = 2$ кг.

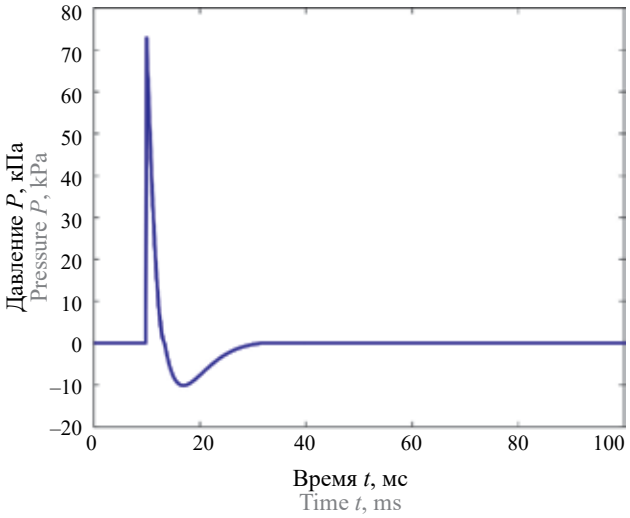


Рис. 3. Зависимость избыточного давления ВУВ от времени на расстоянии $R = 4$ м от заряда ТНТ с массой $M = 2$ кг
Fig. 3. Time dependence of an air shock wave overpressure on distance $R = 4$ m from a TNT charge with a mass of $M = 2$ kg

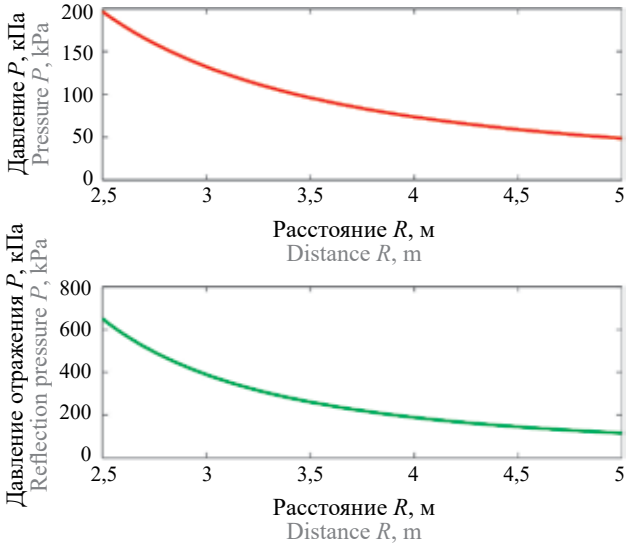


Рис. 4. Зависимость максимальных параметров ВУВ от расстояния ($R = 2{,}5 – 5{,}0$ м) для заряда ТНТ с массой $M = 2$ кг
Fig. 4. Dependence of maximum parameters of an air shock wave on distance ($R = 2.5 – 5.0$ m) from a TNT charge with a mass of $M = 2$ kg

На рис. 5 приведены зависимости от расстояния условных вероятностей разрушений и повреждений, создаваемых ВУВ, генерируемой зарядом ТНТ с массой $M = 2$ кг. На первом графике рис. 5 приведены условные вероятности полных разрушений типовых зданий ($V_1 = 0$); на втором графике приведены условные вероятности средних разрушений типовых зданий и вероятности гибели человека под действием ВУВ (V_2); на третьем графике приведены условные вероятности разрыва барабанных перепонок у человека (V_4); на нижнем графике рис. 5 приведены зависимости от расстояния максимального давления в ВУВ.

[5] *Литвиненко В.И., Герасимов В.* Организация, вооружение и тактика иностранных армий : учеб. пос. М. : Кнорос, 2020. 240 с.

[6] *Литвиненко В.И.* Беспилотники — применение и борьба с ними : учеб. пос. М. : Кнорус, 2022.

[7] *Michel A.H.* Counter-drone systems. Center Study Drone Bard College, Bard College, NY, USA, Tech. Rep., Dec. 2019. URL: https://dronecenter.bard.edu/files/2019/12/CSD-CUAS-2ndEdition-Web.pdf

[8] Drone Deploy. The Rise of Drones in Construction. 2018. URL: https://www.dronedeploy.com/blog/rise-drones-construction

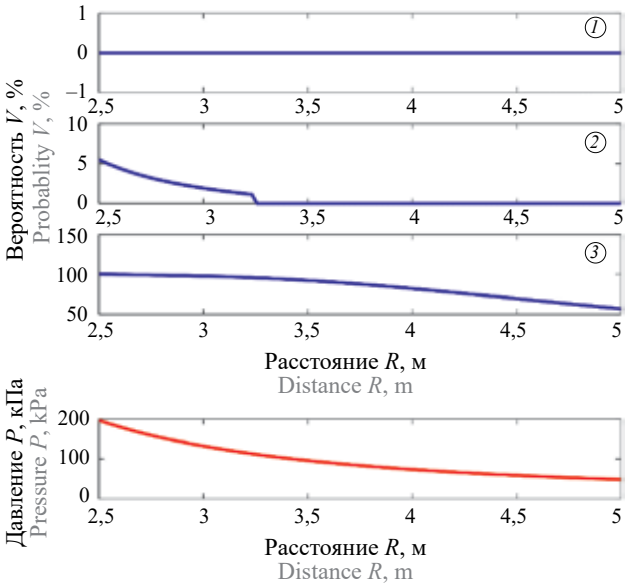


Рис. 5. Зависимость условной вероятности разрушений и повреждений, создаваемых ВУВ, и максимальных параметров ВУВ от расстояния (R = 2,5 – 5,0 м) для заряда ТНТ с массой M = 2 кг; *1*, *2*, *3* — вероятности V_1, V_2, V_4 соответственно
Fig. 5. Dependence of conditional probability of destruction and damage caused by an air shock wave and maximum parameters of an air shock wave on distance (R = 2.5 – 5.0 m) from a TNT charge with a mass M = 2 kg ; *1*, *2*, *3* are probabilities V_1, V_2, V_4, respectively

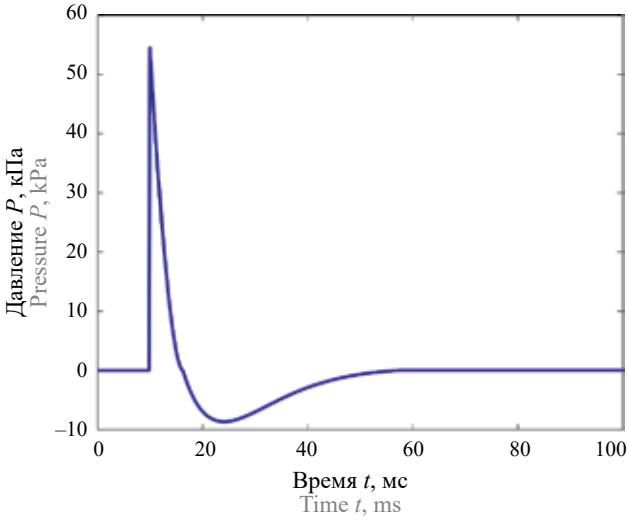


Рис. 6. Зависимость избыточного давления ВУВ от времени на расстоянии R = 8 м от заряда ТНТ с массой M = 10 кг
Fig. 6. Time dependence of an air shock wave overpressure on distance R = 8 m from a TNT charge with a mass of M = 10 kg

На рис. 6–8 приведены аналогичные зависимости для заряда ТНТ с массой M = 10 кг.

На рис. 6 приведена временная зависимость ВУВ, генерируемой зарядом ТНТ с массой M = 10 кг, на расстоянии R = 8 м от заряда.

ВУВ имеет следующие интегральные характеристики: максимальное давление в ВУВ P_{max} = = 54,8 кПа; минимальное давление в волне разрежения P_{min} = –8,7 кПа; импульс положительной

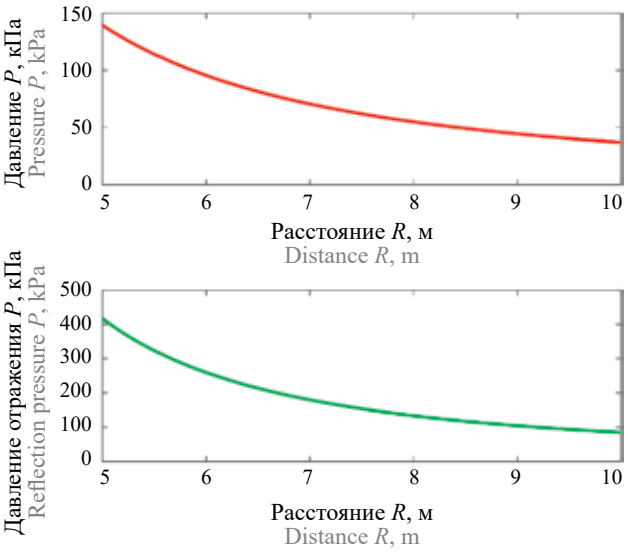


Рис. 7. Зависимость максимальных параметров ВУВ от расстояния (R = 5,0 – 10,0 м) для заряда ТНТ с массой M = 10 кг
Fig. 7. Dependence of maximum parameters of an air shock wave on distance (R = 5.0 – 10.0 m) from a TNT charge with a mass of M = 10 kg

фазы давления I = 122,7 Па·с; T_F — время действия фазы сжатия, приведенной к треугольной форме: $T_F = 2 \cdot I / P_{max}$ = 4,48 мс; давление отражения ВУВ от вертикальной преграды составляет P_{otr} = 133,3 кПа.

На рис. 7 приведены зависимости от расстояния R до места взрыва максимального давления в ВУВ и давления отражения ВУВ от вертикальной преграды, генерируемой зарядом ТНТ с массой M = 10 кг.

На рис. 8 приведены зависимости от расстояния условных вероятностей разрушений и повреждений, создаваемых ВУВ, генерируемой зарядом ТНТ с массой M = 10 кг, и максимальные параметры ВУВ в зависимости от расстояния R до заряда.

На рис. 9–11 приведены аналогичные зависимости для заряда ТНТ с массой M = 50 кг.

На рис. 9 приведена временная зависимость ВУВ, генерируемой зарядом ТНТ с массой M = 50 кг, на расстоянии R = 16 м от заряда.

ВУВ имеет следующие интегральные характеристики: максимальное давление в ВУВ P_{max} = 41,4 кПа; минимальное давление в волне разрежения P_{min} = = –7,4 кПа; импульс положительной фазы давления I = 176,7 Па·с; T_F — время действия фазы сжатия, приведенной к треугольной форме: $T_F = 2 \cdot I / P_{max}$ = = 8,53 мс; давление отражения ВУВ от вертикальной преграды составляет P_{otr} = 96,5 кПа.

На рис. 10 приведены зависимости от расстояния R до места взрыва максимального давления в ВУВ и давления отражения ВУВ от вертикальной преграды, генерируемой зарядом ТНТ с массой M = 50 кг.

На рис. 11 приведены зависимости от расстояния условных вероятностей разрушений и повреж-

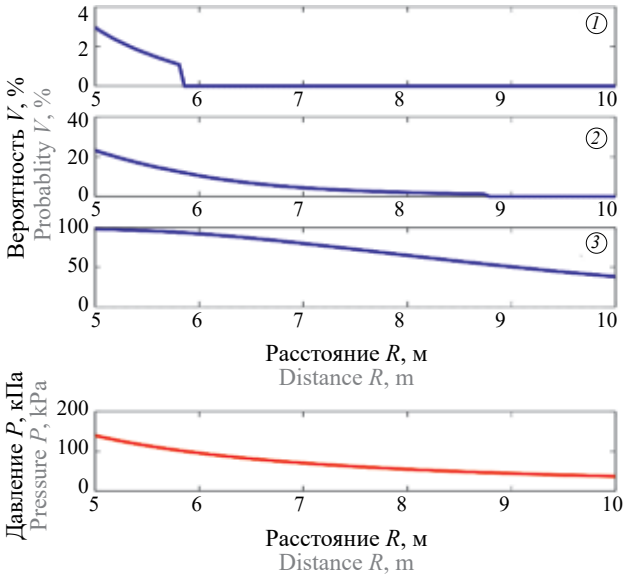


Рис. 8. Зависимость условной вероятности разрушений и повреждений, создаваемых ВУВ, и максимальных параметров ВУВ от расстояния (R = 5,0 – 10,0 м) для заряда ТНТ с массой M = 10 кг; *1*, *2*, *3* — вероятности V_1, V_2, V_4 соответственно

Fig. 8. Dependence of conditional probability of destruction and damage caused by an air shock wave and maximum parameters of an air shock wave on distance R = 5.0 – 10.0 m from a TNT charge with a mass M = 10 kg; *1*, *2*, *3* are probabilities V_1, V_2, V_4, respectively

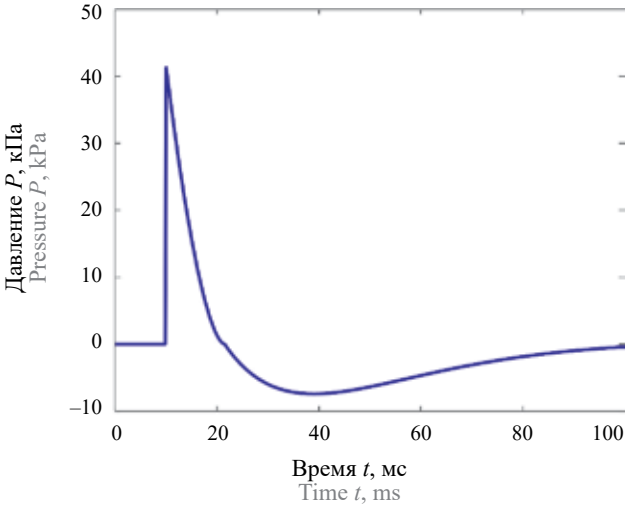


Рис. 9. Зависимость избыточного давления ВУВ от времени на расстоянии R = 16 м от заряда ТНТ с массой M = 50 кг

Fig. 9. Time dependence of an air shock wave overpressure on distance R = 16 m from a TNT charge with a mass of M = 50 kg

дений, создаваемых ВУВ, генерируемой зарядом ТНТ с массой M = 50 кг, и максимальные параметры ВУВ в зависимости от расстояния R до заряда.

Выводы

С целью оценки эффективности, технической возможности конструирования и применения ЗОК был рассмотрен вариант защиты объектов, подвергаемых атакам БПЛА, основанный на применении сетчатых ограждающих конструкций. Основной задачей был расчет минимальных расстояний от сеток до ограждающих конструкций зданий и сооружений, на основе которого возможно дать качественную и количественную оценку применимости данного способа защиты от БПЛА.

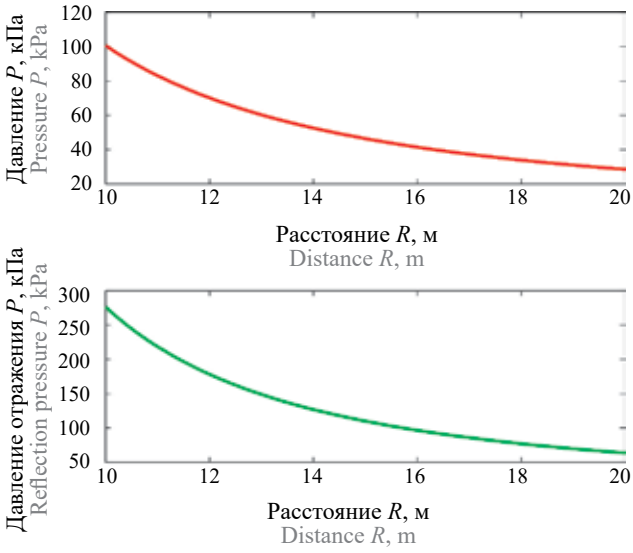


Рис. 10. Зависимость максимальных параметров ВУВ от расстояния (R = 10,0 – 20,0 м) для заряда ТНТ с массой M = 50 кг

Fig. 10. Dependence of maximum parameters of an air shock wave on distance (R = 10.0 – 20.0 m) from a TNT charge with a mass of M = 50 kg

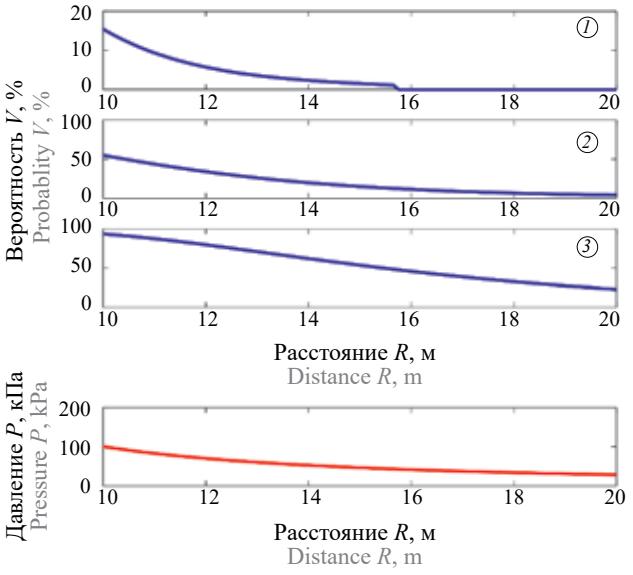


Рис. 11. Зависимость условной вероятности разрушений и повреждений, создаваемых ВУВ, и максимальных параметров ВУВ от расстояния (R = 10,0 – 20,0 м) для заряда ТНТ с массой M = 50 кг; *1*, *2*, *3* — вероятности V_1, V_2, V_4 соответственно

Fig. 11. Dependence of conditional probability of destruction and damage caused by an air shock wave and maximum parameters of an air shock wave on distance (R = 10.0 – 20.0 m) from a TNT charge with a mass M = 50 kg; *1*, *2*, *3* are probabilities V_1, V_2, V_4, respectively

Из приведенных расчетов можно сделать вывод, что для объектов, которые могут подвергаться атакам малых БПЛА, способных нести заряды с массой до $M = 2$ кг, расстояние от сетки до ближайшей границы объекта должно быть не менее чем $R = 4$ м. При таком расположении защитной сетки воздушная ударная волна, создаваемая зарядом ВВ, который может доставить БПЛА, не будет представлять опасности для защищаемого объекта.

Для объектов, которые могут подвергаться атакам средних БПЛА, способных нести заряды с массой до $M = 10$ кг, расстояние от сетки до ближайшей границы объекта должно быть не менее чем $R = 8$ м.

Для объектов, которые могут подвергаться атакам больших БПЛА, способных нести заряды с массой до $M = 50$ кг, расстояние от сетки до ближайшей границы объекта должно быть не менее чем $R = 16$ м.

Указанные минимальные расстояния приведены без учета прогиба сетчатого экрана при ударе БПЛА. Полученные минимальные расстояния должны быть увеличены на значение максимального прогиба сетки при ударе. Оценка максимального прогиба сетки может быть осуществлена как аналитическими, так и численными методами, доступными проектировщикам [23, 24], и поэтому не создает проблем в области проектирования ЗОК.

Таким образом можно сделать вывод, что современные технические решения и материалы: сетки[9, 10] и стальные канаты[11, 12], используемые при проектировании ЗОК, позволяют обеспечить указанные выше расстояния от сетчатых конструкций до защищаемого объекта, что говорит об эффективности подобных конструкций.

[9] ГОСТ Р 51285–99. Сетки проволочные крученые с шестиугольными ячейками для габионных конструкций. Технические условия.

[10] ГОСТ 5336–80. Сетки стальные плетеные одинарные. Технические условия.

[11] ГОСТ 2172–80. Канаты стальные авиационные. Технические условия.

[12] ГОСТ 3063–80. Канат одинарной свивки типа ТК конструкции 1 × 19 (1 + 6 + 12). Сортамент.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. *Мантула А.Ю., Ромащенко М.А.* Классификация типов БПЛА и возможных технических способов противодействия : сб. тр. победителей конкурса науч.-исслед. работ студентов и аспирантов ВГТУ по приоритетным направлениям развития науки и технологий. Воронеж, 2024.
2. *Honggu Kang, Jingon Joung, Jinyoung Kim, Joonhyuk Kang, Yong Soo Cho*. Protect your sky : a survey of counter unmanned aerial vehicle systems // IEEE Access. 2020. Vol. 8. DOI: 10.1109/ACCESS.2020.3023473
3. *Butt A., Shah S.I.A., Zaheer Q.* Weapon launch system design of anti-terrorist UAV // International Conference on Engineering and Emerging Technologies (ICEET). 2019. Pp. 1–8. DOI: 10.1109/CEET1.2019.8711832
4. *Asnafi M., Dastgheibifard S*. A review on potential applications of unmanned aerial vehicle for construction industry. Sustainable structures and materials // An International Journal. 2018. No. 1 (2). Pp. 44–53. DOI: 10.26392/SSM.2018.01.02.044
5. *Черненко А.А., Земляной В.Е.* Направления развития форм и способов противодействия беспилотным воздушным судам : сб. науч. ст. III Межведомств. науч.-практ. конф. Новосибирск, 2024.
6. *Лопатько С.В., Киселев А.Я.* К вопросу об организации противодействия малым беспилотным летательным аппаратам : сб. науч. ст. III Межведомств. науч.-практ. конф. Новосибирск, 2024.
7. Protecting Against the Threat of Unmanned Aircraft Systems (UAS). U.S. Department of Homeland Security Cybersecurity and Infrastructure Security Agency Interagency Security Committee. November 2020 Edition.
8. *Brust M.R., Danoy G., Bouvry P., Gashi D., Pathak H., Gonc M.P.* Defending against Intrusion of Malicious UAVs with Networked UAV Defense Swarms. 2017 IEEE 42nd Conference on Local Computer Networks Workshops. DOI: 10.1109/LCN.Workshops.2017.71
9. *Jeelani I., Gheisari M.* Safety challenges of UAV integration in the construction industry: Focusing on workers at height. University of Florida, October 2022.
10. *Mutis I., Romero A.F.* Thermal performance assessment of curtain walls of fully operational buildings using infrared thermography and unmanned aerial vehicles // Proceedings of the 35th CIB W78 2018 Conference: IT in Design, Construction, and Management. Springer, 2019. Pp. 703–709. DOI: 10.1007/978-3-030-00220-6_84
11. *Беляев А.Ф., Садовский М.А.* Механическое действие воздушных ударных волн взрыва по данным экспериментальных исследований // Физика взрыва. № 1. М. : АН СССР, 1952.
12. *Бейкер У., Кокс П., Уэстайн П., Кулеш Дж., Стрелоу Р.* Взрывные явления. Оценка и последствия : в 2 кн. / пер. с англ. под ред. Я.Б. Зельдовича, Б.Е. Гельфанда. М. : Мир, 1986. 319 с.
13. *Андреев К.К., Беляев А.Ф.* Теория взрывчатых веществ. М. : Оборонгиз, 1960. 595 с.
14. *Комаров А.А.* Прогнозирование нагрузок от аварийных дефлаграционных взрывов и оценка последствий их воздействия на здания и сооружения : дис. … д-ра техн. наук. М. : МГСУ, 2001. 460 с.
15. *Котляревский В.А. и др.* Убежища гражданской обороны. Конструкция и расчет. М. : Стройиздат, 1989.
16. *Хуснутдинов Д.З. и др.* Аварийные взрывы газовоздушных смесей в атмосфере. М. : НИУ МГСУ, 2014. 80 с.

17. *Расторгуев Б.С. и др.* Проектирование зданий и сооружений при аварийных взрывных воздействиях. М. : Изд-во Ассоциации строительных вузов, 2007. 152 с.
18. *Бирбраер А.Н., Роледер А.Ю.* Экстремальные воздействия на сооружения. СПб. : Изд-во Политехнического университета, 2009. 594 с.
19. *Литвиненко В.И.* Барражирующие беспилотники — боеприпасы // Армейский сборник. 2023. № 4. URL: https://army.ric.mil.ru/Stati/item/481638/
20. *Сосницкий В.* Поле боя на земле и в эфире // Армейский сборник. 2018. № 11.
21. *Гумелев В.Ю. и др.* Иранские беспилотные летательные аппараты «Мохаджер» и «Абабиль» // Армейский сборник. 2021. № 10.
22. *Irizarry J., Costa D.B.* Exploratory study of potential applications of unmanned aerial systems for construction management tasks // Journal of Engineering, Management and Information Technology. 2016. Vol. 32. Issue 3. DOI: 10.1061/(ASCE)ME.1943-5479.0000422
23. *Кошляков Н.С., Глинер Э.Б., Смирнов М.М.* Уравнения в частных производных математической физики. М. : Высшая школа, 1970. 710 с.
24. Справочник проектировщика. Динамический расчет сооружений на специальные воздействия. М. : Стройиздат, 1981. 248 с.

REFERENCES

1. Mantula A.Yu., Romashchenko M.A. *Classification of UAV types and possible technical methods of counteraction : a collection of works by the winners of the competition of research works by students and postgraduates of VSTU in priority areas of science and technology development*. Voronezh, 2024. (rus).
2. Honggu Kang, Jingon Joung, Jinyoung Kim, Joonhyuk Kang, Yong Soo Cho. *Protect Your Sky : a Survey of Counter Unmanned Aerial Vehicle Systems. IEEE Access.* 2020; 8. DOI: 10.1109/ACCESS.2020.3023473
3. Butt A., Shah S.I.A., Zaheer Q. Weapon launch system design of anti-terrorist UAV. *International Conference on Engineering and Emerging Technologies (ICEET).* 2019; 1-8. DOI: 10.1109/CEET1.2019.8711832
4. Asnafi M., Dastgheibifard S. A review on potential applications of unmanned aerial vehicle for construction industry. Sustainable structures and materials. *An International Journal*. 2018; 1(2):44-53. DOI: 10.26392/SSM.2018.01.02.044
5. Chernenko A.A., Zemlyanoi V.E. Directions of development of forms and methods of countering unmanned aircraft. *Collection of scientific articles of the III Interdepartmental scientific and practical conference.* Novosibirsk, 2024. (rus).
6. Lopatko S.V., Kiselev A.Ya. On the issue of the organization of counteraction to small unmanned aerial vehicles. *Collection of Scientific Articles of the III Interdepartmental scientific and practical conference*. Novosibirsk, 2024. (rus).
7. Protecting Against the Threat of Unmanned Aircraft Systems (UAS). *U.S. Department of Homeland Security Cybersecurity and Infrastructure Security Agency Interagency Security Committee.* November 2020 Edition.
8. Brust M.R., Danoy G., Bouvry P., Gashi D., Pathak H., Gonc M.P. *Defending against Intrusion of Malicious UAVs with Networked UAV Defense Swarms. 2017 IEEE 42nd Conference on Local Computer Networks Workshops*. DOI: 10.1109/LCN.Workshops.2017.71
9. Jeelani I., Gheisari M. *Safety Challenges of UAV Integration in the Construction Industry: Focusing on Workers at Height.* University of Florida, October 2022.
10. Mutis I., Romero A.F. Thermal performance assessment of curtain walls of fully operational buildings using infrared thermography and unmanned aerial vehicles. *Proceedings of the 35th CIB W78 2018 Conference: IT in Design, Construction, and Management*. 2019; 703-709. DOI: 10.1007/978-3-030-00220-6_84
11. Belyaev A.F., Sadovsky M.A. Mechanical action of air shock waves of explosion according to experimental research data. *Physics of explosion, collection No. 1.* Moscow, USSR Academy of Sciences, 1952. (rus).
12. Baker W., Cox P., Westine P., Kulesh J., Strelow R. *Explosive Phenomena. Evaluation and Consequences : in 2 books.* Translation from English edited by Ya.B. Zeldovich, B.E. Gelfand. Moscow, Mir Publ., 1986; 319. (rus).
13. Andreev K.K., Belyaev A.F. *Theory of explosives.* Oborongiz, Moscow, 1960; 595. (rus).
14. Komarov A.A. *Forecasting loads and estimating consequences of their impact on buildings and structures : Doctoral Thesis.* Moscow, MSCU, 2001; 460. (rus).
15. Kotlyarevsky V.A. et al. *Emergency Shelters in Civil Defense. Structure and Calculations.* Moscow, Stroyizdat, 1989. (rus).
16. Khusnutdinov D.Z. et al. *Accidental Explosions of Gas-Air Mixtures in Atmosphere*. Moscow, NRU MSCU, 2014; 80. (rus).
17. Rastorguev B.S. et al. *Project Designing of Buildings and Installations Against Accident Explosion Impacts.* Moscow, Association of Construction Building Universities Publishing, 2007; 152. (rus).
18. Birbraer A.N., Rolleder A.Yu. *Extreme Impacts over Installations.* Saint-Petersburg, Published by the Tech University, 2009; 594. (rus).
19. Litvinenko V.I. Barrage drones — ammunition. *Army Collection.* 2023; 4. URL: https://army.ric.mil.ru/Stati/item/481638/ (rus).
20. Sosnitsky V. The battlefield on the ground and on the air. *Army collection*. 2018; 11. (rus).

21. Gumelev V.Yu. et al. Iranian unmanned aerial vehicles “Mohajer” and “Ababil”. *Army collection*. 2021; 10. (rus).
22. Irizarry J., Costa D.B. Exploratory Study of Potential Applications of Unmanned Aerial Systems for Construction Management Tasks. *Journal of Engineering, Management and Information Technology.* 2016; 32(3). DOI: 10.1061/(ASCE)ME.1943-5479.0000422
23. Koshlyakov N.S., Gliner E.B., Smirnov M.M. *Partial differential equations of mathematical physics.* Moscow, Higher School Publ., 1970; 710. (rus).
24. Construction Designer’s Reference Book. *Dynamic Analysis of Specific Impacts.* Moscow, Stroyizdat Publ., 1981; 248. (rus).

Поступила 23.09.2024, после доработки 24.09.2024;
принята к публикации 26.09.2024
Received September 23, 2024; Received in revised form September 24, 2024;
Accepted September 26, 2024

Информация об авторах

КОМАРОВ Александр Андреевич, д.т.н., профессор кафедры комплексной безопасности в строительстве, руководитель НИЦ «Взрывобезопасность» ИКБС, Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет, Россия, 129337, г. Москва, Ярославское шоссе, 26; РИНЦ ID: 155673; Scopus AuthorID: 57192380312; ResearcherID: AAC-8725-2022; ORCID: 0000-0003-2764-639X; e-mail: KomarovAA@mgsu.ru

ГРОМОВ Николай Викторович, к.т.н., заведующий лабораторией газодинамики и взрыва НИЦ «Взрывобезопасность» ИКБС, Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет, Россия, 129337, г. Москва, Ярославское шоссе, 26; РИНЦ ID: 550242; AuthorID: 57192376754; ORCID: 0000-0002-9685-0880; e-mail: N. Gromov@ikbs-mgsu.ru

КОРОЛЬЧЕНКО Антон Дмитриевич, заведующий сектором испытаний научно-исследовательского центра «Взрывобезопасность» Института комплексной безопасности в строительстве, преподаватель кафедры комплексной безопасности в строительстве, соискатель на уч. ст. канд. техн. наук, Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет, Россия, 129337, г. Москва, Ярославское шоссе, 26; РИНЦ ID: 890113; Scopus AuthorID: 57215919375; ResearcherID: E-3295-2017; ORCID: 0000-0002-1383-574X; e-mail: Anton.Korolchenko@ikbs-mgsu.ru

ЛАНСКОЙ Павел Сергеевич, преподаватель, Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет, Россия, 129337, г. Москва, Ярославское шоссе, 26; РИНЦ ID: 9558-9900; ResearcherID: JOP-7507-2023; ORCID: 0000-0002-6184-0279; e-mail: 6451187@mail.ru

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

Information about the authors

Alexander A. KOMAROV, Dr. Sci. (Eng.), Professor of Department of Integrated Safety in Civil Engineering, Head of the Explosion Safety Research Center of Institute of Complex Safety in Construction, Moscow State University of Civil Engineering (National Research University), Yaroslavskoe Shosse, 26, Moscow, 129337, Russian Federation; ID RISC: 155673; Scopus AuthorID: 57192380312; ResearcherID: AAC-8725-2022; ORCID: 0000-0003-2764-639X; e-mail: KomarovAA@mgsu.ru

Nikolay V. GROMOV, Cand. Sci. (Eng.), Head of the Laboratory of Gas Dynamics and Explosion of the Explosion Safety Research Center of Institute of Complex Safety in Construction, Moscow State University of Civil Engineering (National Research University), Yaroslavskoye Shosse, 26, Moscow, 129337, Russian Federation; ID RISC: 550242; Scopus AuthorID: 57192376754; ResearcherID: AAO-5120-2021; ORCID: 0000-0002-9685-0880; e-mail: N. Gromov@ikbs-mgsu.ru

Anton D. KOROLCHENKO, Head of Testing Sector of Explosion Safety Research Center, Institute of Integrated Safety in Construction, Lecturer of Department of Integrated Safety in Construction, Moscow State University of Civil Engineering (National Research University), Yaroslavskoe Shosse, 26, Moscow, 129337, Russian Federation; ID RISC: 890113; Scopus AuthorID: 57215919375; ResearcherID: E-3295-2017; ORCID: 0000-0002-1383-574X; e-mail: Anton.Korolchenko@ikbs-mgsu.ru

Pavel S. LANSKOY, Lecturer-Researcher, Moscow State University of Civil Engineering (National Research University), Yaroslavskoe Shosse, 26, Moscow, 129337, Russian Federation; ID RISC: 9558-9900; ResearcherID: OP-7507-2023; ORCID: 0000-0002-6184-0279; e-mail: 6451187@mail.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.

ПОЖАРОВЗРЫВОБЕЗОПАСНОСТЬ/FIRE AND EXPLOSION SAFETY. 2024. Т. 33. № 5. С. 61–71
POZHAROVZRYVOBEZOPASNOST/FIRE AND EXPLOSION SAFETY. 2024; 33(5):61-71

НАУЧНАЯ СТАТЬЯ/RESEARCH PAPER

УДК 614.844.2:006.354

https://doi.org/10.22227/0869-7493.2024.33.05.61-71

Определение огнетушащей способности автономных термоактивируемых устройств газового пожаротушения

Ольга Николаевна Корольченко ✉, Дмитрий Витальевич Поляков, Софья Андреевна Ковалева

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

АННОТАЦИЯ

Введение. Для локализации возгораний в электротехнических шкафах в последнее время все большее распространение получают автономные термоактивируемые устройства газового пожаротушения (АТУГП). Данные устройства производятся, подлежат обязательному подтверждению соответствия в виде сертификации, но нормативные требования к ним и методы испытаний отсутствуют. Их сертификация проводится по техническим решениям, разработанным на основании действующих стандартов и содержащим методы испытаний, которые разработаны для другой продукции, но применимы и для рассматриваемых устройств. Цель настоящей статьи — разработать методику определения огнетушащей способности автономных термоактивируемых устройств газового пожаротушения. Для этого необходимо:

- разработать конструкцию огневой камеры, позволяющей корректно проводить определение огнетушащей способности;
- обеспечить термоактивацию автономных устройств;
- провести апробацию предложенной методики.

Материалы и методы. Для определения огнетушащей способности использовалось АТУГП в виде герметично закрытой с обоих торцов полимерной трубки, заполненной газовым огнетушащим веществом в жидкой фазе. Для проведения испытаний были взяты устройства с защищаемым объемом от 50 до 2000 дм^3. Эксперимент проводился в огневой камере с изменяемым внутренним объемом, изготовленной из негорючего материала в виде шкафа с двумя дверцами.

Результаты и их обсуждение. Разработанная методика позволяет определять огнетушащую способность для каждой единицы устройства в отдельности в условиях, максимально приближенных к условиям эксплуатации. Серия испытаний показала, что огнетушащая способность рассмотренных АТУГП с защищаемым объемом от 50 до 2000 дм^3 находится в диапазоне от 48 до 125 с.

Выводы. Предложена конструкция огневой камеры с изменяющимся объемом, позволяющая корректно проводить определение огнетушащей способности устройств с защищаемым объемом от 200 до 2000 дм^3. Для обеспечения стабильного срабатывания применен очаг-инициатор, обеспечивающий термоактивацию автономных устройств. Определена огнетушащая способность АТУГП.

Ключевые слова: возгорание в электротехнических шкафах; очаг-инициатор; модельный очаг пожара; огневая камера; термоактивация

Благодарности. Данная работа была реализована в рамках программы развития передовой инженерно-строительной школы НИУ МГСУ.

Для цитирования: *Корольченко О.Н., Поляков Д.В., Ковалева С.А.* Определение огнетушащей способности автономных термоактивируемых устройств газового пожаротушения // Пожаровзрывобезопасность/Fire and Explosion Safety. 2024. Т. 33. № 5. С. 61–71. DOI: 10.22227/0869-7493.2024.33.05.61-71

✉ *Корольченко Ольга Николаевна*, e-mail: O. Korolchenko@ikbs-mgsu.ru

Determination of fire extinguishing ability of autonomous thermoactivated gas fire extinguishing devices

Olga N. Korolchenko ✉, Dmitry V. Polyakov, Sofya A. Kovaleva

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

ABSTRACT

Introduction. To localize fires in electrical cabinets, autonomous thermoactivated gas fire extinguishing devices (ATGFED) have recently become more and more widespread. These devices are produced, subject to mandatory confirmation of conformity in the form of certification, but there are no regulatory requirements and test methods for them.

© О.Н. Корольченко, Д.В. Поляков, С.А. Ковалева, 2024

Their certification is carried out according to technical solutions developed on the basis of current standards and containing test methods, which are developed for other products, but applicable to the devices under consideration.
The purpose of this paper is to develop a methodology for determining the extinguishing ability of autonomous thermally activated gas fire extinguishing devices. For this purpose, it is necessary to:
- to develop the design of the fire chamber, allowing to correctly carry out the determination of extinguishing capacity;
- to provide thermoactivation of autonomous devices;
- to carry out approbation of the proposed methodology.

Materials and methods. To determine the fire extinguishing ability was used ATGFED in the form of hermetically sealed at both ends of the polymer tube filled with gas extinguishing agent in the liquid phase. For testing were taken devices with protected volume from 50 to 2,000 dm^3. The experiment was conducted in a fire chamber with variable internal volume made of non-combustible material in the form of a cabinet with two doors.

Results and their discussion. The developed methodology makes it possible to determine the fire extinguishing capacity for each unit of the device separately under conditions as close as possible to the operating conditions. A series of tests showed that the fire extinguishing capacity of the considered ATGFED with a protected volume from 50 to 2,000 dm^3 is in the range from 48 to 125 seconds.

Conclusions. The design of a fire chamber with a variable volume, allowing to correctly carry out the determination of the fire extinguishing ability of devices with a protected volume from 200 to 2,000 dm^3 is proposed. To ensure stable operation, a hearth-initiator is applied, which provides thermal activation of autonomous devices. The fire extinguishing ability of ATGFED is determined.

Keywords: fire in electrical cabinets; initiator hearth; model fire centre; fire chamber; thermoactivation; fire chamber; thermoactivation

Acknowledgments. The research was funded by Moscow State University of Civil Engineering (National Research University), (MGSU Advanced Civil Engineering School development programme).

For citation: Korolchenko O.N., Polyakov D.V., Kovaleva S.A. Determination of fire extinguishing ability of autonomous thermoactivated gas fire extinguishing devices. *Pozharovzryvobezopasnost/Fire and Explosion Safety*. 2024; 33(5):61-71. DOI: 10.22227/0869-7493.2024.33.05.61-71 (rus).

✉ *Olga Nikolaevna Korolchenko*, e-mail: O. Korolchenko@ikbs-mgsu.ru

Введение

Пожарная безопасность зданий, сооружений, локальных элементов инженерных систем остается актуальной проблемой несмотря на существование различных видов систем пожаротушения. Ни одна из систем не способна обеспечить полную безопасность объектов. Так, например, спринклерные и дренчерные установки не всегда в состоянии сдержать распространение пламени до прибытия пожарных подразделений [1]. Для объектов, находящихся в труднодоступной местности, предлагается применение модулей газового пожаротушения, использующих в качестве тушащего агента сжиженный углекислый газ или фреон [2]. Эффективность систем пожаротушения зависит от типа системы, обслуживания, соответствия стандартам [3] и физических основ их работы, таких как конструктивное исполнение, инерционность, продолжительность подачи средств пожаротушения [4]. Кроме того, продолжается изучение механизмов развития пожара: большая часть пожаров начинается с когерентного плавучего потока газа, поднимающегося над локализованным объемом, в котором происходит горение [5], а при тушении вблизи твердых веществ конвективный тепловой поток достигает максимального значения, после чего затухает из-за прекращения химических реакций [6]. Предлагаются также способы повышения эффективности существующих методов обнаружения: например, комбинация датчиков дыма и температуры может обнаружить пожар на очень ранней стадии и предоставить данные для его локализации [7]. Эффективность тушения повышают за счет модернизации систем пожаротушения, например, путем смешивания сжатого воздуха с водно-пенным раствором либо применения роботизированных систем пожаротушения [8, 9].

В последнее время электроустановки приобрели новый вектор внедрения — в электромобилях. Формируется концепция технических решений для комплектования оперативных пожарных и аварийно-спасательных формирований для тушения пожаров электромобилей [10]. Согласно статистике наблюдается увеличение количества пожаров, связанных с нарушением правил устройства и эксплуатации электрооборудования [11]. Отмечается также, что нарушение правил эксплуатации электрооборудования является второй по распространенности причиной пожаров в РФ после неосторожного обращения с огнем. Для защиты объектов с электронным оборудованием применяют как генераторы огнетушащего аэрозоля (ГОА) [12], установки тонкораспыленной воды [13], так и установки газового пожаротушения [14, 15].

Для локализации возгораний в электротехнических шкафах в последнее время все большее распространение получают автономные термоактивируемые устройства газового пожаротушения

(АТУГП) [16]. Примеры таких устройств приведены в патентах[1, 2].

При этом мы наблюдаем некоторый юридический казус. Технический регламент ЕЭС[3] предъявляет требование к автономным устройствам пожаротушения обеспечивать подачу огнетушащего вещества (ОТВ) с требуемыми (нормируемыми) характеристиками при их срабатывании от воздействия одного или нескольких опасных факторов пожара. Перечень продукции, в отношении которой подача таможенной декларации сопровождается представлением документа об оценке соответствия[4], также включает в себя автономные устройства пожаротушения, а перечень документов по стандартизации, обеспечивающих соблюдение требований ТР[3], в разделе «Устройства пожаротушения автономные» содержит документы[5, 6, 7, 8] [17]. Таким образом, мы имеем следующее: автономные термоактивируемые устройства газового пожаротушения производятся, подлежат обязательному подтверждению соответствия в виде сертификации, но нормативные требования к ним и методы испытаний отсутствуют. Так как ТР ЕАЭС 043/2017[3] предусматривает возможность в случае отсутствия стандартов применять для подтверждения соответствия технические решения, то производители, органы по сертификации и испытательные лаборатории пользуются этой возможностью. Технические решения разрабатываются на основании действующих стандартов и содержат методы испытаний, которые разработаны для другой продукции, но применимы для рассматриваемых устройств.

Технические решения, разработанные для целей подтверждения соответствия автономных термоактивируемых устройств газового пожаротушения требованиям ТР[3], содержат подтверждаемые технические характеристики и методы испытаний. Характеристики, как правило, указываются следующие: классы загораний и пожаров по ГОСТу[9], защищаемый объем, температура эксплуатации, максимальное напряжение защищаемого оборудования, снаряженная масса, масса ОТВ, габаритные размеры. Для подтверждения соответствия указанных характеристик применяют методы испытаний, указанные в ГОСТах[6, 5] (ГОСТ[5] отменен в 2023 г. в связи с вступлением в силу ГОСТа[8]) и ГОСТ 34635-2020[8].

В литературе неоднократно указывалось на необходимость для безотказной работы установок пожаротушения совершенствовать методы огневых испытаний, повышать требования к условиям их проведения [18, 19], а также проводить натурные испытания для определения огнетушащих характеристик устройств пожаротушения [20].

Одним из основных испытаний является определение огнетушащей способности автономных термоактивируемых устройств газового пожаротушения. Для устройств с защищаемым объемом до 180 дм^3 эти исследования проводят в огневых камерах по ГОСТ[6], применяемых для автономных устройств пожаротушения с использованием термоактивируемых микрокапсулированных газовыделяющих ОТВ, в простонародье называемых пиростикерами. Данный стандарт предусматривает использовать для каждого устройства отдельную огневую камеру с соответствующим объемом и нормирует модельные очаги пожара (МОП) для камер разного объема. Для устройств с защищаемым объемом свыше 180 дм^3 эти исследования проводят в огневых камерах[8], применяемых для генераторов огнетушащего аэрозоля. Именно этот вариант рассмотрим подробнее.

Для определения огнетушащей способности ГОА применяют огневую камеру — условно герметичное испытательное помещение из негорючего материала, объем которого должен быть равен сумме максимальных объемов защищаемых условно герметичных помещений для всех одновременно испытуемых ГОА одного типоразмера, при этом отношение длины к ширине и длины к высоте должно находиться в пределах от 1:1 до 2:1. В огневой камере устанавливают не менее четырех МОП класса В (рис. 1): два очага — на высоте относительно пола на уровне 10 % и по одному — на уровнях 50 и 90 % от высоты камеры. Так как общая высота МОП класса В составляет 210 мм, то минимальная высота камеры должна быть 2100 мм (лучше 2200 мм), чтобы были выпол-

[1] RU 210431 U1. Автономная установка пожаротушения (заявка 2021120428 от 12.07.2021; опубл. 15.04.2022. Бюл. № 11).

[2] RU 214139 U1. Автономное устройство пожаротушения монокапсульного типа направленного действия (заявка 2022122988 от 26.08.2022; опубл. 12.10.2022. Бюл. № 29).

[3] О требованиях к средствам обеспечения пожарной безопасности и пожаротушения (ТР ЕАЭС 043/2017) : Технический регламент ЕЭС.

[4] Об утверждении перечня продукции, в отношении которой подача таможенной декларации сопровождается представлением документа об оценке соответствия (сведений о документе об оценке соответствия) требованиям технического регламента Евразийского экономического союза «О требованиях к средствам обеспечения пожарной безопасности и пожаротушения» : Решение Коллегии ЕЭК от 08.10.2019 № 170.

[5] ГОСТ Р 53284–2009. Техника пожарная. Генераторы огнетушащего аэрозоля. Общие технические требования. Методы испытаний.

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

[7] СТ РК 1489–2006. Техника пожарная. Генераторы огнетушащего аэрозоля. Общие технические требования. Методы испытаний.

[8] ГОСТ 34635–2020. Техника пожарная. Генераторы огнетушащего аэрозоля. Общие технические требования и методы испытаний.

[9] ГОСТ 27331–87 (СТ СЭВ 5637–86). Пожарная техника. Классификация пожаров.

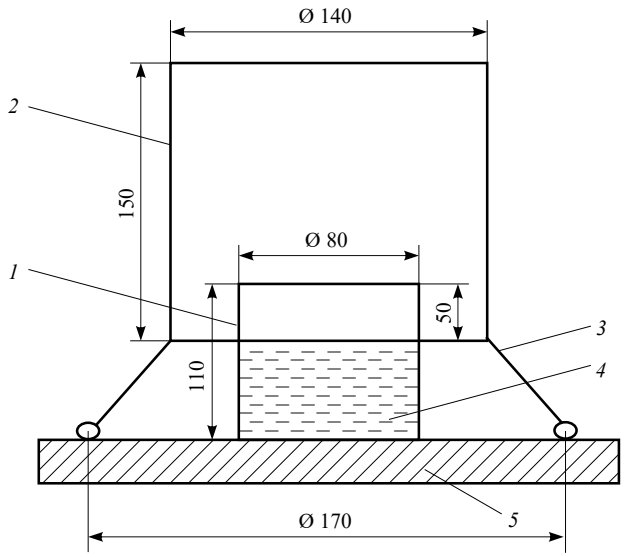


Рис. 1. Модельный очаг пожара класса В: *1* — горелка; *2* — защитный экран; *3* — опорные стержни экрана; *4* — горючая жидкость; *5* — опора
Fig. 1. Model fire centre of class B: *1* — burner; *2* — protective screen; *3* — screen support rods; *4* — flammable liquid; *5* — support

нены требования по их размещению. Следовательно, исходя из требований по соотношению сторон, минимальный размер камеры должен составлять 2,2 × 2,2 × 1,1 м (высота × длина × ширина), а ее минимальный объем — 5,3 м^3.

Аналогичная ситуация с размерами огневой камеры для испытаний с применением очага подкласса А2. Три МОП высотой 340 мм (рис. 2) устанавливают вертикально таким образом, чтобы их нижние торцы находились на расстоянии от пола, равном 10, 50 и 90 % высоты. Тогда минимальный размер камеры должен быть 3,5 × 3,5 × 1,75 м (высота × длина × ширина), а ее минимальный объем — 21,4 м^3. Результаты испытаний считают положительными, если в двух экспериментах из трех получены положительные результаты. При положительном результате в первых двух испытаниях третье испытание не проводят. При этом следует обратить внимание, что ГОСТ Р 53284[5] не содержал конструкции очага подкласса А2, а только определял размеры полимерных пластин, что позволяло использовать камеру объемом 5,3 м^3.

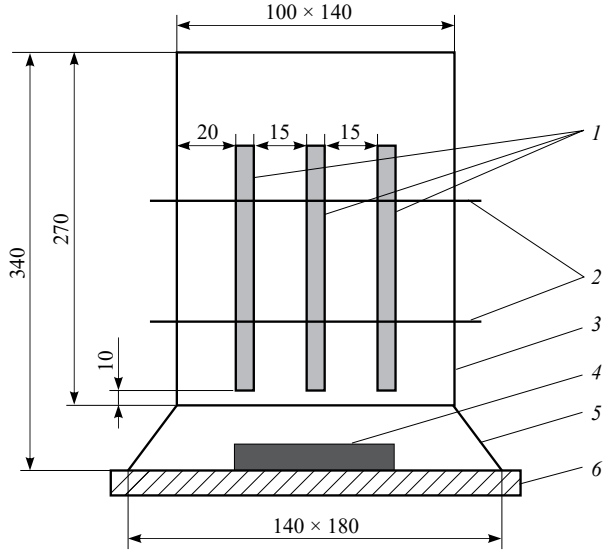


Рис. 2. Модельный очаг пожара подкласса А2: *1* — полимерные пластины; *2* — направляющие стержни для пластин очага; *3* — защитный экран; *4* — противень для зажигания полимерных пластин очага; *5* — опорные стержни защитного экрана в количестве 3 шт.; *6* — опора
Fig. 2. Model fire centre of subclass A2: *1* — polymer plates; *2* — guide rods for hearth plates; *3* — protective screen; *4* — tray for ignition of hearth polymer plates; *5* — support rods of the protective screen in number of 3 pieces; *6* — support

При использовании данной методики получаем, что для определения огнетушащей способности автономных устройств с защищаемым объемом 200 дм^3 для тушения МОП класса В на огневую камеру объемом 5,3 м^3 необходимо одновременно разместить 27 устройств, а эксперимент повторить минимум 2 раза. Для тушения МОП подкласса А2 на огневую камеру объемом 21,4 м^3 необходимо одновременно разместить уже 107 устройств и т.д. Но есть и еще одна проблема, связанная с тем, что у АТУГП, как правило, отсутствует возможность принудительного пуска. Их активация происходит за счет теплового потока от МОП, и при одновременном размещении двух и более автономных устройств в испытательной камере нет возможности обеспечить их одновременное срабатывание, что негативно отражается на стабильности результатов. Таким образом, получается, что методика определения огнетушащей способности генераторов огнетушащего аэрозоля непригодна для автономных термоактивируемых устройств газового пожаротушения.

Цель настоящей статьи — разработать методику определения огнетушащей способности автономных термоактивируемых устройств газового пожаротушения. Для этого необходимо:

- разработать конструкцию огневой камеры, позволяющей корректно проводить определение огнетушащей способности;
- обеспечить термоактивацию автономных устройств;
- провести апробацию предложенной методики.

Материалы и методы

Для определения огнетушащей способности использовались автономные термоактивируемые устройства газового пожаротушения в виде герметично закрытой с обоих торцов полимерной трубки, заполненной газовым огнетушащим веществом в жидкой фазе (рис. 3).

Для проведения испытаний были взяты устройства с защищаемым объемом от 50 до 2000 дм^3 с шагом 100. Эксперимент проводился в огневой камере с изменяе-

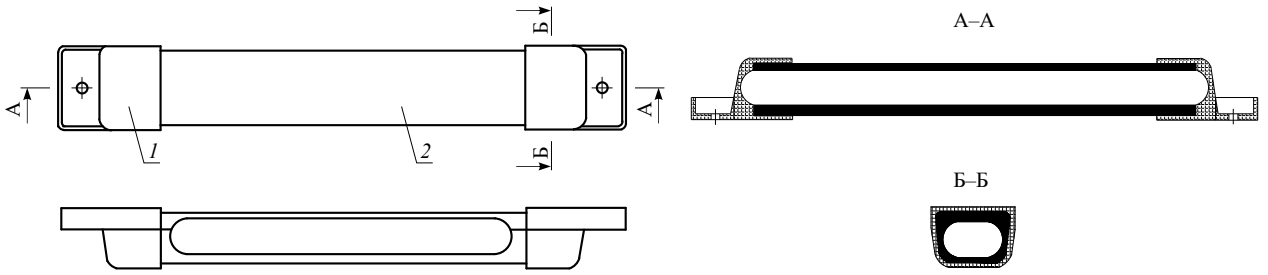


Рис. 3. Общий вид автономного термоактивируемого устройства газового пожаротушения: *1* — полимерная капсула с газовым огнетушащим веществом; *2* — кронштейны для крепления

Fig. 3. General view of autonomous thermoactivated gas fire extinguishing device: *1* — polymer capsule with gas extinguishing agent; *2* — mounting brackets

мым внутренним объемом (далее – камера), изготовленной из негорючего материала в виде шкафа с двумя дверцами. В дверцах выполнены вставки из закаленного стекла, защищенные с наружной стороны металлической сеткой. Огневая камера имеет следующие (внутренние) размеры (глубина × ширина × высота): 800 × 1200 × 2100 мм. Для изменения внутреннего объема огневой камеры используются перегородки также из негорючего материала (две вертикальные и две горизонтальные). Конструкция огневой камеры с изменяемым объемом содержит расположенные на нижней грани (на дне) шкафа проемы, выполненные в виде отверстий диаметром $(35{,}00^{+0{,}35})$ мм в количестве 100 шт. (в зависимости от установленного объема) с возможностью их открытия и закрытия. В задней стенке и горизонтальных перегородках огневой камеры устроены дополнительные проемы с возможностью регулирования площади открытия для регулировки воздухообмена. Количество отверстий в разграниченном отделении огневой камеры зависит от объема огневой камеры в соответствии с табл. 1.

Фактический объем огневой камеры соответствует максимально допустимому объему, для которого устройство пожаротушения обеспечивает огнетушащую способность согласно ТД, или превышает его не более чем на 5 %.

Для камер высотой до 1000 мм использовался один модельный очаг пожара, расположенный по центральной оси на середине высоты огневой камеры.

Для огневой камеры высотой от 1000 мм применялся один модельный очаг пожара класса В и один очаг-инициатор, используемый для инициирования устройства пожаротушения (рис. 4).

Очаг-инициатор выполнен в виде противня из негорючего материала высотой 30 мм и размером 300 × 60 мм, заполненного горючей жидкостью (бензин[10] или н-гептан[11]). Количество горючей жидкости в очаге-инициаторе составляло (75 ± 5) г для обеспечения свободного горения горючей жидкости в течение (120 ± 30) с. Очаг-инициатор устанавливали по центральной оси на высоте (300 ± 50) мм от верхнего торца очага до устройства пожаротушения, закрепленного в верхней части огневой камеры.

Таблица 1. Зависимость количества отверстий от объема огневой камеры

Table 1. Dependence of the number of holes on the volume of the fire chamber

Объем огневой камеры, дм³ Fire chamber volume, dm³	Размер разграниченного отделения, мм Size of delimited compartment, mm	Количество отверстий Number of openings
200	400 × 600 × 840	10
300	400 × 600 × 1250	15
400	600 × 600 × 1150	20
500	800 × 600 × 1050	25
600	800 × 600 × 1250	30
700	800 × 600 × 1500	35
800	800 × 600 × 1700	40
900	800 × 600 × 1900	45
1000	800 × 600 × 2100	50
1100	800 × 1200 × 1150	55
1200	800 × 1200 × 1250	60
1300	800 × 1200 × 1400	65
1400	800 × 1200 × 1500	70
1500	800 × 1200 × 1600	75
1600	800 × 1200 × 1700	80
1700	800 × 1200 × 1800	85
1800	800 × 1200 × 1900	90
1900	800 × 1200 × 2000	95
2000	800 × 1200 × 2100	100

[10] Национальный стандарт РФ ГОСТ Р 51105–2020. Топлива для двигателей внутреннего сгорания. Бензин неэтилированный. Технические условия.

[11] ГОСТ 25828–83. Гептан нормальный эталонный. Технические условия.

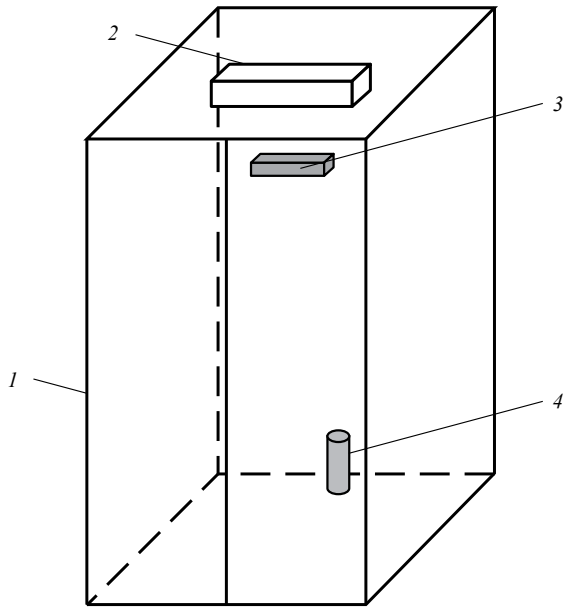


Рис. 4. Общий вид огневой камеры с изменяемым внутренним объемом и размещенными в ней модельным очагом пожара и очагом-инициатором: *1* — огневая камера с изменяемым внутренним объемом; *2* — устройство газового пожаротушения автономное термоактивируемое; *3* — очаг-инициатор; *4* — модельный очаг пожара

Fig. 4. General view of the fire chamber with a variable internal volume and a model fire centre and initiator: *1* — fire chamber with variable internal volume; *2* — autonomous thermoactivated gas fire extinguishing device; *3* — initiator hearth; *4* — model fire centre

Модельный очаг пожара (см. рис. 1 и 2) расположен таким образом, чтобы нижний торец находился на расстоянии от пола, равном 10 % от высоты камеры, и на расстоянии 50 мм от задней стенки. Очаг-инициатор установлен по центральной оси на высоте (300 ± 50) мм от верхнего торца очага до устройства пожаротушения, закрепленного в верхней части огневой камеры.

Перед началом огневых испытаний проводилась проверка воздухообмена в огневой камере. Метод проверки предусматривает контроль изменения массы горючего вещества МОП в результате свободного горения и последующего самотушения в огневой камере при отсутствии устройства пожаротушения. Цель проверки — убедиться, что постоянно открытые проемы и плотность конструктивных элементов огневой камеры обеспечивают достаточный воздухообмен, при котором потеря массы сгораемой части МОП составляет не менее 90 %.

После проверки воздухообмена проводились испытания по определению огнетушащей способности. Поджигали подготовленный и взвешенный МОП, размещенный в огневой камере, и измеряли время с момента зажигания МОП до его тушения с помощью устройства пожаротушения. Тушение МОП определялось визуально по прекращению пламенного горения и интенсивного дымовыделения из камеры.

Затем огневая камера выдерживалась в закрытом положении 3 мин, в течение которых фиксировалось наличие или отсутствие повторного загорания. После каждого огневого испытания проводилась очистка камеры от остатков горючего материала и продуктов сгорания, а также ее проветривание и охлаждение с открытой дверцей не менее 2 ч.

Таким образом проводились испытания трех образцов устройств для тушения пожара класса В и подкласса А2.

Результаты каждой пары огневых опытов считались положительными, если в каждом опыте:

- время тушения МОП не превышало 5 мин;
- в течение 3 мин после тушения не происходило повторного воспламенения.

Результаты огневых испытаний по проверке огнетушащей способности устройства пожаротушения для МОП каждого класса пожара считают положительными, если в трех последовательно проведенных парах огневых опытов получены положительные результаты.

Результаты и их обсуждение

Согласно описанной методике были проведены испытания автономных термоактивируемых устройств газового пожаротушения, предназначенных для различных защищаемых объемов. Перед началом испытаний проводилась проверка воздухообмена в огневых камерах. Результаты проверки, приведенные в табл. 2, показывают, что воздухообмен в камере обеспечивает потерю массы сгораемой части МОП не менее 90 %.

Затем проводилась проверка огнетушащей способности устройства пожаротушения для МОП каждого класса пожара. Устройства АТУГП 50 и АТУГП 150 испытывались в огневых шкафах[6],

Таблица 2. Результаты проверки воздухообмена в огневых камерах

Table 2. Results of air exchange test in fire chambers

Объем камеры, дм³ Chamber volume, dm³	Высота камеры, мм Chamber height, mm	Потеря массы, %, МОП Weight loss, %, MFS	
		A2	B
50	790	94	93
150	890	93	93
200	840	93	93
300	1250	93	93
400	1150	94	93
600	1250	93	94
800	1700	93	93
1200	1250	93	94
1600	1700	93	94
2000	2100	94	94

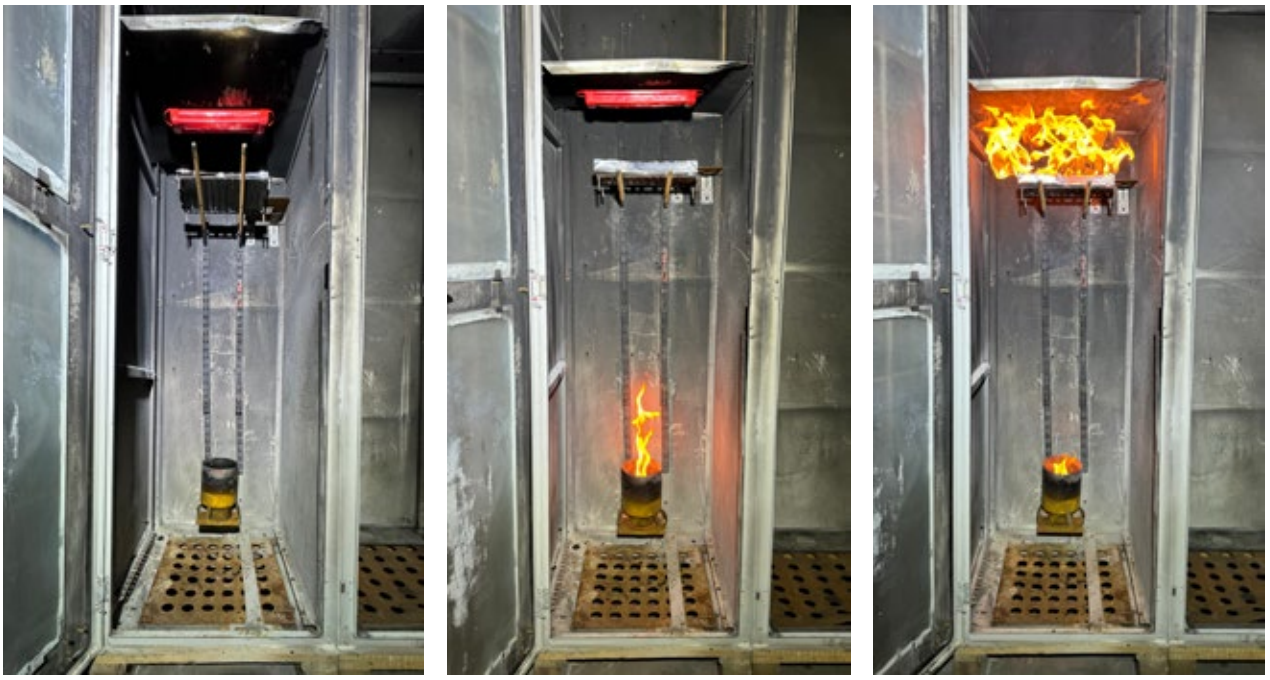


Рис. 5. Определение огнетушащей способности автономных термоактивируемых устройств газового пожаротушения
Fig. 5. Determination of extinguishing capacity of autonomous thermoactivated gas extinguishing devices

а устройства АТУГП 200 – АТУГП 2000 — в огневой камере с изменяемым внутренним объемом (рис. 5).

Результаты испытаний приведены в табл. 3 (указаны средние значения для трех опытов).

Для всех испытанных устройств время тушения МОП не превысило 5 мин, повторное возгорание в течение 3 мин после тушения отсутствовало. Из табл. 3 видно, что максимальное время тушения 125 и 122 с для А2, 79 и 80 с — для В показали соответственно АТУГП 150 и АТУГП 200.

Это обусловлено тем, что их испытания проводились в камерах высотой соответственно 890 и 840 мм на одном модельном очаге пожара, расположенном по центральной оси на середине высоты огневой камеры. При этом расстояние от МОП до устройств пожаротушения было максимальным по сравнению с другими испытанными образцами. При испытании образцов с защищаемым объемом 300 дм^3 и более дополнительно использовался очаг-инициатор, расположенный по центральной оси на высоте 300 мм от верхнего торца очага до устройства пожаротушения. С увеличением объема огневой камеры происходило плавное увеличение времени тушения, что хорошо видно на рис. 6.

Нужно также отметить, что время тушения очагов подкласса А2 несколько больше, чем очагов класса В. Это связано со скоростью нарастания температуры в зоне установки устройства пожаротушения при горении очагов А2 и В (рис. 7). Представленные на рис. 7 данные получены при установке МОП таким образом, чтобы верхняя кромка очага находилась на расстоянии

Таблица 3. Результаты испытаний по проверке огнетушащей способности устройства пожаротушения для МОП подкласса А2 и класса В
Table 3. Fire extinguishing device extinguishing capacity test results for MFS subclass A2 and class B

Модель Model	Время тушения, с, МОП Extinguishing time, s, MFS		Повторное возгорание в течение 3 мин после тушения Re-ignition within 3 min after extinguishing
	A2	B	
АТУГП 50 ATGFED 50	68	48	Отсутствует Absent
АТУГП 150 ATGFED 150	125	79	
АТУГП 200 ATGFED 200	122	80	
АТУГП 300 ATGFED 300	60	50	
АТУГП 400 ATGFED 400	63	48	
АТУГП 600 ATGFED 600	66	50	
АТУГП 800 ATGFED 800	70	55	
АТУГП 1200 ATGFED 1200	69	58	
АТУГП 1600 ATGFED 1600	85	65	
АТУГП 2000 ATGFED 2000	90	69	

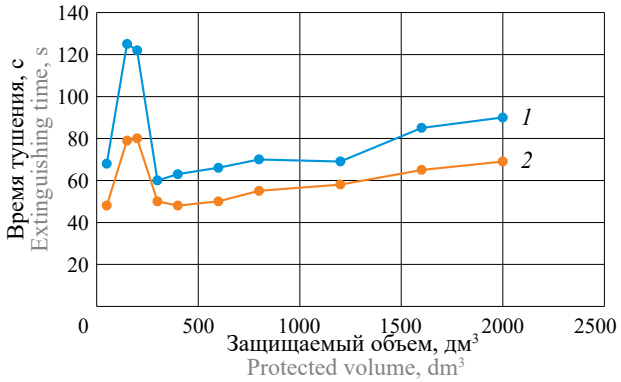


Рис. 6. Зависимость времени тушения МОП А2 (*1*) и В (*2*) от защищаемого объема автономными термоактивируемыми устройствами газового пожаротушения
Fig. 6. Dependence of extinguishing time of MFS A2 (*1*) and B (*2*) on the protected volume by autonomous thermoactivated gas fire extinguishing devices

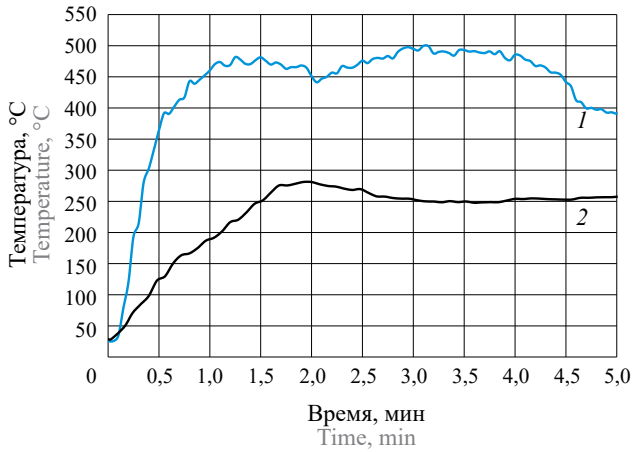


Рис. 7. Зависимость температуры, создаваемой МОП, от времени: *1* — н-гептан; *2* — полипропилен
Fig. 7. Time dependence of the temperature generated by MFS: *1* — n-heptane; *2* — polypropylene

300 мм от термоэлектрического преобразователя, применяемого для измерения температуры.

Выводы

В ходе работы проведен анализ существующих методик определения огнетушащей способности автономных устройств пожаротушения. Выявлено, что методику определения огнетушащей способности генераторов огнетушащего аэрозоля невозможно применять для автономных термоактивируемых устройств газового пожаротушения. Это связано с тем, что у АТУГП, как правило, отсутствует возможность принудительного пуска: их активация происходит за счет теплового потока от МОП. Кроме того, при одновременном размещении двух и более автономных устройств в испытательной камере нет возможности обеспечить их одновременное срабатывание, что негативно отражается на стабильности результатов. А методика для автономных устройств пожаротушения с применением термоактивируемых микрокапсулированных газовыделяющих огнетушащих веществ предназначена для устройств с защищаемым объемом до 180 дм³ и не распространяется на бóльшие объемы.

Разработанная методика позволяет определять огнетушащую способность для каждой единицы устройства в отдельности, создавая условия проведения испытаний, максимально приближенные к условиям эксплуатации.

Предложена конструкция огневой камеры с изменяющимся объемом, позволяющая корректно проводить определение огнетушащей способности устройств с защищаемым объемом от 200 до 2000 дм³.

Для обеспечения стабильного срабатывания применен очаг-инициатор, обеспечивающий термоактивацию автономных устройств.

Серия испытаний для автономных термоактивируемых устройств показала, что огнетушащая способность испытанных АТУГП с защищаемым объемом от 50 до 2000 дм³ находится в диапазоне от 48 до 125 с.

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. № 28 (6). С. 71–79. DOI: 10.18322/PVB.2019.28.06.71-79. EDN BSRSQZ.
2. *Квасов М.В., Легкова И.А., Никифоров А.Л.* Разработка бюджетных систем пожаротушения для объектов индивидуального жилищного строительства // Современные проблемы гражданской защиты. 2022. № 2 (43). С. 72–78. URL: https://cyberleninka.ru/article/n/razrabotka-byudzhetnyh-sistem-pozharotusheniya-dlya-obektov-individualnogo-zhilischnogo-stroitelstva (дата обращения: 09.09.2024).
3. *Агафонов В.В., Бухтояров Д.В., Казаков А.В., Копылов С.Н., Голубчиков В.Б., Житков А.В., Голубев А.Д.* Повышение эффективности и безопасности практического применения средств аэрозольного пожаротушения // XXIX Междунар. науч.-практ. конф., посвящ. 80-летию ФГБУ ВНИИПО МЧС России : мат. конф. (г. Балашиха, 5 июля 2017 г.). В 2 ч. Ч. 2. Балашиха : ВНИИПО, 2017. С. 341–344.
4. *Жвакин М.В., Оруджова О.Н.* Физические основы работы современных систем пожаротушения // Международный студенческий научный вестник. 2019. № 1. URL: https://elibrary.ru/download/elibrary_37034768_69250314.pdf (дата обращения: 09.09.2024). EDN YYIZHF.
5. *Heskestad G.* Fire plumes, flame height, and air entrainment // SFPE Handbook of Fire Protection Engineering. Springer, New York, NY, 2016. Pp. 396–428. DOI: 10.1007/978-1-4939-2565-0_13

6. *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
7. *Xin Y., 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. 2017. Vol. 53. Pp. 1847–1884. DOI: 10.1007/s10694-017-0662-2
8. *Lee J.-W., Lim W.-S., Kim S.-S., Rie D.-H.* A study on fire extinguishing performance evaluation of compressed air foam system // Journal of Korean Institute of Fire Science and Engineering. 2012. Vol. 26. Issue 5. Pp. 73–78. DOI: 10.7731/kifse.2012.26.5.073
9. *Liu P., Yu H., Cang S., Vladareanu L.* Robot-assisted smart firefighting and interdisciplinary perspectives // Proceedings of 22nd International Conference on Automation and Computing (ICAC). University of Essex, Colchester, UK, September 7–8, 2016. Colchester, UK, 2016. Pp. 395–401. DOI: 10.1109/IConAC.2016.7604952
10. *Алешков М.В., Иощенко Д.А., Ольховский И.А.* Пожары различных видов электроустановок и способы их тушения // Пожаровзрывобезопасность/Fire and Explosion Safety. 2020. № 29 (5). С. 51–59. DOI: 10.22227/PVB.2020.29.05.51-59
11. *Корнилов А.А., Бородин А.А., Мосяков М.В.* О необходимости применения автономных установок пожаротушения для защиты электрических шкафов // Проблемы обеспечения безопасности при ликвидации последствий чрезвычайных ситуаций. 2017. Т. 1. С. 368–373. EDN ZANCZV.
12. *Боровков И.А.* Способ защиты крупных объектов с электронным оборудованием твердотопливными импульсными генераторами огнетушащего аэрозоля // Территория Нефтегаз. 2021. № 5–6. С. 80–81.
13. *Алешков М.В., Гусев И.А.* Обеспечение технологии пожаротушения в замкнутых объемах помещений объектов энергетики // Системы безопасности : мат. Междунар. науч.-техн. конф. 2017. № 26. С. 176–179.
14. *Пушкин В.А.* Применение автономных установок газового пожаротушения для противопожарной защиты приборных и электротехнических шкафов // Территория Нефтегаз. 2006. № 11. С. 38–43. URL: https://cyberleninka.ru/article/n/primenenie-avtonomnyh-ustanovok-gazovogo-pozharotusheniya-dlya-protivopozharnoy-zaschity-pribornyh-i-elektrotehnicheskih-shkafov (дата обращения: 09.09.2024).
15. *Корольченко А.Я., Шилина Е.Н.* Газовое пожаротушение // Пожаровзрывобезопасность/Fire and Explosion Safety. 2016. № 25 (5). С. 57–65. DOI: 10.18322/PVB.2016.25.05.57-65
16. *Дмитриев О.В., Попов В.И., Пуганов М.В.* Применение микрокапсул в тушении пожаров // Современные проблемы гражданской защиты. 2022. № 2 (43). С. 59–65. URL: https://cyberleninka.ru/article/n/primenenie-mikrokapsul-v-tushenii-pozharov (дата обращения: 09.09.2024).
17. *Мизина Е.Н., Васильев Г.Н., Егорова Т.Н., Утюгова Н.А.* Автономные установки и устройства пожаротушения. Особенности применения и сертификации // Актуальные вопросы пожарной безопасности. 2022. № 1 (11). С. 56–60. URL: https://cyberleninka.ru/article/n/avtonomnye-ustanovki-i-ustroystva-pozharotusheniya-osobennosti-primeneniya-i-sertifikatsii (дата обращения: 09.09.2024).
18. *Селиверстов В.И., Саенкова А.Б.* Анализ эффективности работы автоматических установок пожаротушения // Актуальные проблемы пожарной безопасности : мат. XXXIV Междунар. науч.-практ. конф., посвящ. 85-летию образования ФГБУ ВНИИПО МЧС России (г. Балашиха, 23–24 августа 2022 г.). Балашиха : ВНИИПО, 2022. С. 241–248.
19. *Саркисов С.В., Рузманов М.Д., Потапенко В.В., Булат В.А.* Методика и результаты испытаний автоматической системы противопожарной защиты, разработанной для подземных объектов // Военный инженер. 2021. № 4 (22). С. 35–44. URL: https://cyberleninka.ru/article/n/metodika-i-rezultaty-ispytaniy-avtomaticheskoy-sistemy-protivopozharnoy-zaschity-razrabotannoy-dlya-podzemnyh-obektov (дата обращения: 09.09.2024).
20. *Танаева М.С., Семиглазов В.А.* Разработка автономной системы автоматического пожаротушения для 3D-принтеров // Электронные средства и системы управления : матер. докладов Междунар. науч.-практ. конф. 2018. № 1–2. С. 247–251.

REFERENCES

1. Bondar A.I., Meshalkin E.A., Tanklevskiy 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. EDN BSRSQZ. (rus).
2. Kvasov M.V., Legkova I.A., Nikiforov A.L. Development of budget fire extinguishing systems for individual housing construction objects. *Modern Problems of Civil Protection*. 2022; 2(43):72-78. URL: https://cyberleninka.ru/article/n/razrabotka-byudzhetnyh-sistem-pozharotusheniya-dlya-obektov-individualnogo-zhilischnogo-stroitelstva (accessed: 09.09.2024). (rus).
3. Agafonov V.V., Bukhtoyarov D.V., Kazakov A.V., Kopylov S.N., Golubchikov V.B., Zhitkov A.V., Golubev A.D. Increasing the efficiency and safety of the practical use of aerosol fire extinguishing agents. *XXIX International Scientific and*

Practical Conference dedicated to the 80th anniversary of the Federal State Budgetary Institution VNIIPO EMERCOM of Russia : *conference materials (Balashikha, July 5, 2017)*. *In 2 parts. Part 2.* Balashikha, VNIIPO, 2017; 341-344. (rus).
4. Zhvakin M.V., Orudzhova O.N. Physical fundamentals of modern fire extinguishing systems. *International Student Scientific Newsletter.* 2019; 1. URL: https://elibrary.ru/download/elibrary_37034768_69250314.pdf (accessed: 09.09.2024). EDN YYIZHF. (rus).
5. Heskestad G. Fire plumes, flame height, and air entrainment. *SFPE Handbook of Fire Protection Engineering*. Springer, New York, NY, 2016; 396-428. DOI: 10.1007/978-1-4939-2565-0_13
6. 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
7. Xin Y., 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*. 2017; 53:1847-1884. DOI: 10.1007/s10694-017-0662-2
8. Lee J.-W., Lim W.-S., Kim S.-S., Rie D.-H. A study on fire extinguishing performance evaluation of compressed air foam system. *Journal of Korean Institute of Fire Science and Engineering*. 2012; 26(5):73-78. DOI: 10.7731/kifse.2012.26.5.073
9. Liu P., Yu H., Cang S., Vladareanu L. Robot-assisted smart firefighting and interdisciplinary perspectives. *Proceedings of 22nd International Conference on Automation and Computing (ICAC). University of Essex, Colchester, UK, September 7–8, 2016*. Colchester, UK, 2016; 395-401. DOI: 10.1109/IConAC.2016.7604952
10. Aleshkov M.V., Ioshchenko D.A., Olkhovsky I.A. Various electrical fires and firefighting methods. *Pozharovzryvobezopasnost/Fire and Explosion Safety*. 2020; 29(5):51-59. DOI: 10.22227/PVB.2020.29.05.51-59 (rus).
11. Kornilov A.A., Borodin A.A., Mosyakov M.V. About necessity of application of autonomous fire extinguishing units for protection of electric cabinets. *Problems of Ensuring Safety During Emergency Response*. 2017; 1:368-373. EDN ZANCZV. (rus).
12. Borovkov I.A. Method of protection of large objects with electronic equipment by solid fuel pulse generators of extinguishing aerosol. *Oil and Gas Territory*. 2021; 5-6:80-81. (rus).
13. Aleshkov M.V., Gusev I.A. Ensuring technology of fire extinguishing in the closed power engineering facilities. *Proceedings of the International Scientific and Technical Conference "Safety Systems"*. 2017; 26:176-179. (rus).
14. Pushkin V.A. Application of autonomous gas fire extinguishing systems for fire protection of instrument and electrical cabinets. *Oil and Gas Territory*. 2006; 11:38-43. URL: https://cyberleninka.ru/article/n/primenenie-avtonomnyh-ustanovok-gazovogo-pozharotusheniya-dlya-protivopozharnoy-zaschity-pribornyh-i-elektrotehnicheskih-shkafov (accessed: 09.09.2024). (rus).
15. Korolchenko A.Ya., Shilina E.N. Gas extinguishing. *Pozharovzryvobezopasnost/Fire and Explosion Safety.* 2016; 25(5):57-65. DOI: 10.18322/PVB.2016.25.05.57-65 (rus).
16. Dmitriyev O.V., Popov V.I., Puganov M.V. The use of microcapsules in fire fighting. *Modern Problems of Civil Protection.* 2022; 2(43):59-65. URL: https://cyberleninka.ru/article/n/primenenie-mikrokapsul-v-tushenii-pozharov- (accessed: 09.09.2024). (rus).
17. Mizina E.N., Vasil'ev G.N., Egorova T.N., Utyugova N.A. Autonomous systems and fire extinguishing devices. features of application and certification. *Current Fire Safety Issues*. 2022; 1(11):56-60. URL: https://cyberleninka.ru/article/n/avtonomnye-ustanovki-i-ustroystva-pozharotusheniya-osobennosti-primeneniya-i-sertifikatsii (accessed: 09.09.2024). (rus).
18. Seliverstov V.I., Saenkova A.B. Analysis of the efficiency of automatic fire extinguishing system. *XXXIV International Scientific and Practical Conference dedicated to the 85th anniversary of the Federal State Budgetary Institution VNIIPO EMERCOM of Russia : conference materials (Balashikha, August 23–24, 2022)*. Balashikha, VNIIPO, 2022; 241-248. (rus).
19. Sarkisov S.V., Ruzmanov M.D., Potapenko V.V., Bulat V.A. Methodology and test results of an automatic fire protection system developed for underground facilities. *Military Engineer*. 2021; 4(22):35-44. URL: https://cyberleninka.ru/article/n/metodika-i-rezultaty-ispytaniy-avtomaticheskoy-sistemy-protivopozharnoy-zaschity-razrabotannoy-dlya-podzemnyh-obektov (accessed: 09.09.2024). (rus).
20. Tanaeva M.S., Semiglazov V.A. Development of an autonomous automatic fire extinguishing system for 3D printers. *Electronic Devices and Control Systems. International Scientific-Practical Conference.* 2018; 1-2:247-251. (rus).

Поступила 18.09.2024, после доработки 27.09.2024;
принята к публикации 30.09.2024
Received September 18, 2024; Received in revised form September 27, 2024;
Accepted September 30, 2024

Информация об авторах

КОРОЛЬЧЕНКО Ольга Николаевна, руководитель Центра оценки соответствия продукции Института комплексной безопасности в строительстве, Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет, Россия, 129337, г. Москва, Ярославское шоссе, 26; Scopus AuthorID: 57222118438; ResearcherID: HKW-4366-2023; РИНЦ ID: 1092980; ORCID: 0000-0003-2568-0834; e-mail: O. Korolchenko@ikbs-mgsu.ru

ПОЛЯКОВ Дмитрий Витальевич, старший преподаватель кафедры комплексной безопасности в строительстве, Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет, Россия, 129337, г. Москва, Ярославское шоссе, 26; ORCID: 0000-0001-8592-3047; e-mail: d.polyakov@ikbs-mgsu.ru

КОВАЛЕВА Софья Андреевна, преподаватель кафедры комплексной безопасности в строительстве, Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет, Россия, 129337, г. Москва, Ярославское шоссе, 26; РИНЦ ID: 1258605; ORCID: 0009-0004-2581-6046; e-mail: s.kovaleva@ikbs-mgsu.ru

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

Information about the authors

Olga N. KOROLCHENKO, Head of Product Conformity Assessment Centre, Institute of Complex Safety in Construction, Moscow State University of Civil Engineering (National Research University), Yaroslavskoe Shosse, 26, Moscow, 129337, Russian Federation; Scopus AuthorID: 57222118438; ResearcherID: HKW-4366-2023; ID RSCI: 1092980; ORCID: 0000-0003-2568-0834; e-mail: O. Korolchenko@ikbs-mgsu.ru

Dmitry V. POLYAKOV, Senior Lecturer, Department of Integrated Safety in Construction, Moscow State University of Civil Engineering (National Research University), Yaroslavskoe Shosse, 26, Moscow, 129337, Russian Federation; ORCID: 0000-0001-8592-3047; e-mail: d.polyakov@ikbs-mgsu.ru

Sofia A. KOVALEVA, Lecturer, Department of Complex Safety in Construction, Moscow State University of Civil Engineering (National Research University), Yaroslavskoe Shosse, 26, Moscow, 129337, Russian Federation; ID RSCI: 1258605; ORCID: 0009-0004-2581-6046; e-mail: s.kovaleva@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.

ПОЖАРОВЗРЫВОБЕЗОПАСНОСТЬ/FIRE AND EXPLOSION SAFETY. 2024. Т. 33. № 5. С. 72–86
POZHAROVZRYVOBEZOPASNOST/FIRE AND EXPLOSION SAFETY. 2024; 33(5):72-86

НАУЧНАЯ СТАТЬЯ/RESEARCH PAPER

УДК 614.841

https://doi.org/10.22227/0869-7493.2024.33.05.72-86

Влияние параметров сечения чугунных тюбингов обделки тоннелей метро на их огнестойкость

Дмитрий Александрович Корольченко, Федор Александрович Портнов ✉

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

АННОТАЦИЯ

Введение. В настоящее время чугун используют в области метростроения для производства специальных изделий — тюбингов отделки тоннелей метро. Возникает острая необходимость учета возможности возникновения пожара в тоннеле метро и воздействия его на тюбинги. В настоящее время отсутствуют способы прогнозирования поведения тюбингов в условиях пожара.

Цель исследования. Оценка влияния характера сечения чугунных тюбингов обделки тоннелей метро на их огнестойкость.

Задачи. Разработка методик и проведение экспериментальных и аналитических оценок огнестойкости чугунных тюбингов; определение корреляции огнестойкости от параметров сечения чугунных тюбингов обделки тоннелей метро.

Объекты исследования. В качестве объекта исследования рассматривались фрагменты тюбингов обделки тоннелей метро, выполненные из чугуна СЧ20.

Методология исследования. В ходе экспериментальной оценки производилась оценка деформации образцов при огневом воздействии. В ходе аналитической оценки — расчет прочности сечения тюбинга с оценкой выполнения условия прочности — определялась критическая температура, при которой сохраняется несущая способность, производилась оценка предельной нагрузки на тюбинг, при которой сохраняется прочность.

Результаты и обсуждение. Для проведения исследования были выбраны экспериментальный и аналитический методы по огнестойкости. В ходе экспериментальной оценки огнестойкости производилась оценка деформации образцов, что также служило показателем достижения предельного состояния образцов, оценка температуры на необогреваемой поверхности образца для дальнейшего использования в аналитической оценке огнестойкости. В ходе аналитической оценки огнестойкости производился расчет прочности сечения тюбинга с оценкой выполнения условия прочности, определялась критическая температура, при которой сохраняется несущая способность. На основании расчета производилась оценка предельной нагрузки на тюбинг, при которой сохраняется прочность. В результате проводимой экспериментальной и аналитической оценки огнестойкости были получены критические величины нагружения для выбранных образцов.

Заключение. Получены экспериментальные зависимости деформации и прогрева чугунных тюбингов обделки от времени огневого воздействия, а также время достижения предельных состояний по потере несущей способности. Определены величины предельных нагрузок на тюбинги, при которых спустя 90 мин от начала огневого воздействия наступает предельное состояние по потере несущей способности. Получена математическая зависимость величины предельной вертикальной нагрузки на образцы, при которой достигается предельное состояние по потере несущей способности, от приведенной толщины сечения тюбингов обделки тоннелей метро.

Ключевые слова: пожарная опасность; строительство подземных сооружений; прогнозирование огнестойкости; аналитические методы оценки огнестойкости

Благодарности. Данная работа была реализована в рамках программы развития передовой инженерно-строительной школы НИУ МГСУ.

Для цитирования: *Корольченко Д.А., Портнов Ф.А.* Влияние параметров сечения чугунных тюбингов обделки тоннелей метро на их огнестойкость // Пожаровзрывобезопасность/Fire and Explosion Safety. 2024. Т. 33. № 5. С. 72–86. DOI: 10.22227/0869-7493.2024.33.05.72-86

✉ *Портнов Федор Александрович,* e-mail: PortnovFA@mgsu.ru

Influence of cross-section parameters of cast-iron tubbings of metro tunnel lining on their fire resistance

Dmitriy A. Korolchenko, Fedor A. Portnov ✉

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

 © Д.А. Корольченко, Ф.А. Портнов, 2024

ABSTRACT

Introduction. Nowadays, cast-iron is used in the field of metro construction for the production of special products — tubbings of metro tunnel finishing. There is an urgent need to take into account the possibility of a fire in the metro tunnel and its impact on the tubbings. At present, there are no ways to predict the behaviour of tubbings in fire conditions.

Aim. Assessment of the influence of the nature of the cross-section of cast-iron tubbings of metro tunnel lining on their fire resistance.

Objectives. Development of methods and carrying out of experimental and analytical assessments of the fire resistance of cast-iron tubbings; determination of the correlation of fire resistance from the cross-section parameters of cast-iron tubbings lining of metro tunnels.

Objects of research. As an object of research, fragments of tubbings of metro tunnel lining, made of cast-iron SCh20, were considered.

Research methodology. In the course of experimental evaluation the deformation of specimens under fire action was assessed. In the course of analytical evaluation — calculation of the strength of the tubbing cross-section with the assessment of the strength condition fulfillment — the critical temperature at which the bearing capacity is preserved was determined, the limiting load on the tubbing at which the strength is preserved was assessed.

Results and discussion. Experimental and analytical methods on fire resistance were chosen for the study. In the course of the experimental assessment of fire resistance, the deformation of the specimens was assessed, which also served as an indicator of the achievement of the limit state of the specimens, the temperature on the unheated surface of the specimen was estimated for further use in the analytical assessment of fire resistance. During the analytical assessment of fire resistance, the strength of the tubbing section was calculated with an assessment of the fulfillment of the strength condition, the critical temperature at which the bearing capacity is preserved was determined. Based on the calculation, the maximum load on the tubbing was estimated, at which the strength is maintained. As a result of the experimental and analytical assessment of fire resistance, critical load values for the selected specimens were obtained.

Conclusion. Experimental dependencies of deformation and heating of cast-iron lining tubbings on the time of fire exposure, as well as the time of reaching the limit states for the loss of bearing capacity, were obtained. The values of the maximum loads on the tubbings are determined, at which after 90 minutes from the beginning of the fire impact, the limit state for the loss of bearing capacity occurs. The mathematical dependence of the value of the maximum vertical load on the specimens, at which the limit state for the loss of bearing capacity is achieved, on the reduced thickness of the section of the tubbings of metro tunnel lining is obtained

Keywords: fire hazard; construction of underground structures; fire resistance forecasting; analytical methods for fire resistance assessment

Acknowledgments. The research was funded by Moscow State University of Civil Engineering (National Research University), (MGSU Advanced Civil Engineering School development programme).

For citation: Korolchenko D.A., Portnov F.A. IInfluence of cross-section parameters of cast-iron tubbings of metro tunnel lining on their fire resistance. *Pozharovzryvobezopasnost/Fire and Explosion Safety*. 2024; 33(5):72-86. DOI: 10.22227/0869-7493.2024.33.05.72-86 (rus).

✉ *Fedor Alexandrovich Portnov*, e-mail: PortnovFA@mgsu.ru

Введение

В настоящее время проводится разработка новых видов тюбингов обделки тоннелей метро. Как известно, данные конструкции требуют особого внимания в плане обеспечения их устойчивости в связи с воздействием больших нагрузок грунта, а также особенностями распределения нагрузок в сборной конструкции кольцеобразной формы [1–3]. Для строительства тоннелей метрополитенов можно использовать различные материалы, такие как сборные чугунные или железобетонные элементы, монолитный бетон и железобетон (рис. 1). Эти материалы обладают высокой прочностью и долговечностью, что позволяет эффективно осуществлять работы с применением индустриальных методов. Для обделки перегонных тоннелей часто используют сборные блоки из железобетона, а в сложных условиях, связанных с гидрогеологическими особенностями строительства, например нестабильными водонасыщенными грунтами, большим гидростатическим давлением и высоким горным давлением, предпочтение отдают сборным обделкам из чугунных тюбингов [4, 5].

Рис. 1. Тоннель Московского метро
Fig. 1. Moscow Metro Tunnel

Одно из распространенных технических решений по созданию тоннелей метро связано с производством железобетонных тюбингов. Железобетонные конструкции обладают рядом преимуществ, но их применение для строительства подземных сооружений связано с рядом затруднений, основанных на изменении механических свойств железобетонных конструкций по причине коррозии и особых температурных условиях при взаимодействии с грунтом, а также в случае воздействия повышенных температур [6–9]. Существует большое количество научных работ, в которых рассматриваются тюбинги обделки из железобетона, в которых описаны общие подходы к безопасности данного типа сооружений [10, 11]. В том числе множество работ направлено на рассмотрение вопросов пожаро- и взрывобезопасности тоннелей метро с использованием железобетонных тюбингов. В ряде работ рассматривается влияние различных добавок для бетона, обеспечивающих уменьшение влияния высоких температур [12, 13]. Важно отметить, что огнестойкость железобетонных конструкций определяется рядом факторов, таких как геометрия, уровень нагрузок, тип арматуры, влажность бетона и другие. На практике огнестойкость конструкций обеспечивается путем учета потери прочности бетона при нагреве, теплового расширения арматуры, появления трещин и потери теплоизоляции [14].

Одним из наиболее перспективных материалов с точки зрения прочностных характеристик является чугун [15–17].

В литературе рассмотрено влияние особенностей состава чугуна, а также характера отлива изделий на их прочностные характеристики [18–21], тем не менее поведение новых видов чугунной обделки при воздействии пожара рассмотрено недостаточно. В работах [22–24] изучены вопросы взрывного воздействия на тюбинги. В научной литературе представлен опыт экспериментальной оценки огнестойкости тюбингов и аналитические подходы к изучению поведения чугунных тюбингов в условиях пожара с использованием нестационарного уравнения теплопроводности с граничными условиями на лучистый и конвективный теплообмен, результаты которых сводятся к тому, что влажный грунт способен обеспечить достаточный отвод тепла от тюбингов [25–27]. В данных работах не рассматривается статическая задача и конструктивные особенности тюбингов, их элементов крепления и ребер жесткости, которые при воздействии повышенных температур могут прогреваться значительнее по сравнению с остальной конструкцией, а также выступать более хрупкими в таких условиях элементами. Кроме того, в рамках аналитических исследований не учитывают изменение теплофизических характеристик при нагреве. В работе [28] рассмотрена проблема обеспечения огнестойкости путевых тоннелей метрополитена с обделкой из чугунных тюбингов. В ряде работ описаны варианты конструктивной огнезащиты тюбингов, исследование которой основывается на оценке теплоизолирующей способности огнезащитных материалов [29–31]. Таким образом, в настоящее время актуальным является изучение огнестойкости новы х видов чугунной обделки на основании результатов экспериментов. Научная новизна работы состоит в том, что исследование огнестойкости чугунных тюбингов будет сопровождаться детальным анализом прогрева тюбинга с последующим аналитическим исследованием их поведения в условиях воздействия повышенных температур. В настоящее время имеется задел в виде проведенных исследований огнестойкости железобетонных тюбингов и других видов строительных конструкций.

С **целью** оценки влияния характера сечения чугунных тюбингов обделки тоннелей метро на их огнестойкость были поставлены следующие **задачи**: разработать методики экспериментального исследования и аналитической оценки огнестойкости чугунных тюбингов обделки тоннелей метро; провести экспериментальную и аналитическую оценку огнестойкости чугунных тюбингов; определить корреляцию огнестойкости от параметров сечения чугунных тюбингов обделки тоннелей метро.

Объекты исследования

Для проведения экспериментальной оценки огнестойкости тюбингов обделки тоннелей метро подготавливается образец — фрагмент тюбинга обделки, представляющего собой единицу продукции, которая используется при сборе полного кольца обделки тоннеля. В качестве объекта исследования рассматривались фрагменты тюбингов обделки тоннелей метро, выполненные из чугуна СЧ20. Всего для испытаний были выбраны элементы 4 типоразмеров, представленных в табл. 1.

Каждый из образцов имеет по 5 поперечных ребер жесткости (в том числе опорных). Образцы длиной 1000 мм (образец 1 и образец 2) имеют по 3 продольных ребра жесткости, а образцы длиной 750 мм (образец 3 и образец 4) — по 2 продольных ребра жесткости.

Общий вид тюбинга приведен на схемах (рис. 2, 3).

Таблица 1. Перечень образцов чугунных тюбингов обделки тоннелей метро
Table 1. List of specimens of cast-iron tubbings metro tunnel lining

Номер образца Specimen Number	Длина дуги тюбинга L_1*, мм Length of the tubbing arc L_1*, mm	Длина тюбинга L_2, мм Tubbing length L_2, mm	Ширина тюбинга b, мм Tubbing width b, mm	Высота тюбинга h, мм Tubbing height h, mm	Минимальная толщина покрытия тюбинга a_1, мм Minimum thickness of tubbing covering a_1, mm	Минимальная толщина ребра жесткости тюбинга a_2, мм Minimum thickness of tubbing stiffening rib a_2, mm
1	1563,81	1653,82	1000	200	22	30
2	1691,6	1735,05	1000	250	25	50
3	1604,1	1676,8	750	350	30	65
4	1812,8	1871,6	750	350	40	65

* — по нижней грани фрагмента тюбинга.
* — along the lower edge of the tubbing fragment.

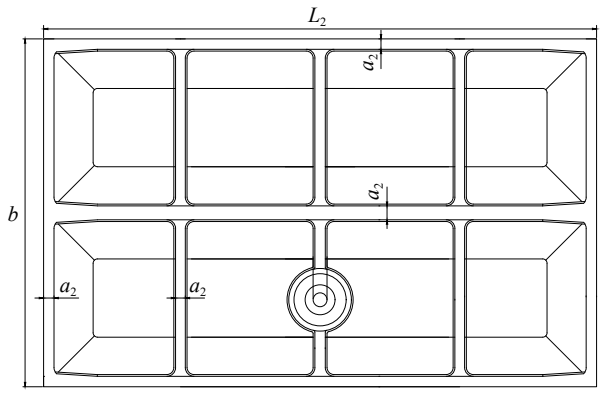


Рис. 2. Общий вид образцов. Вид снизу
Fig. 2. General view of the specimens. Bottom view

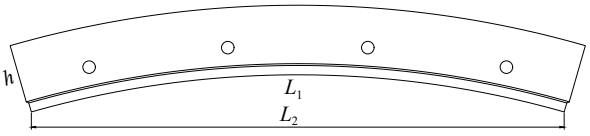


Рис. 3. Общий вид образцов. Вид сбоку
Fig. 3. General view of the specimens. Bottom view

Методология исследования

Для реализации исследования разработана блок-схема исследования, приведенная на рис. 4.

Для исследований всех типов описанных конструкций использовалось оборудование — испытательные печи, обеспечивающие возможность воздействия «стандартного» режима пожара, описываемого зависимостью $T - T_0 = 345 \lg (8t + 1)$, где T — температура в огневом пространстве на расстоянии 100 мм от испытываемого объекта исследования, T_0 — начальная температура, t — время испытания, мин.

График зависимости среднеобъемной температуры в огневой камере от времени теплового воздействия приведен на рис. 5.

Исследования проводились при температуре окружающей среды от 20 до 30 °С и при скорости движения воздуха не более 0,5 м/с. Общими критериями оценки всех исследований являются

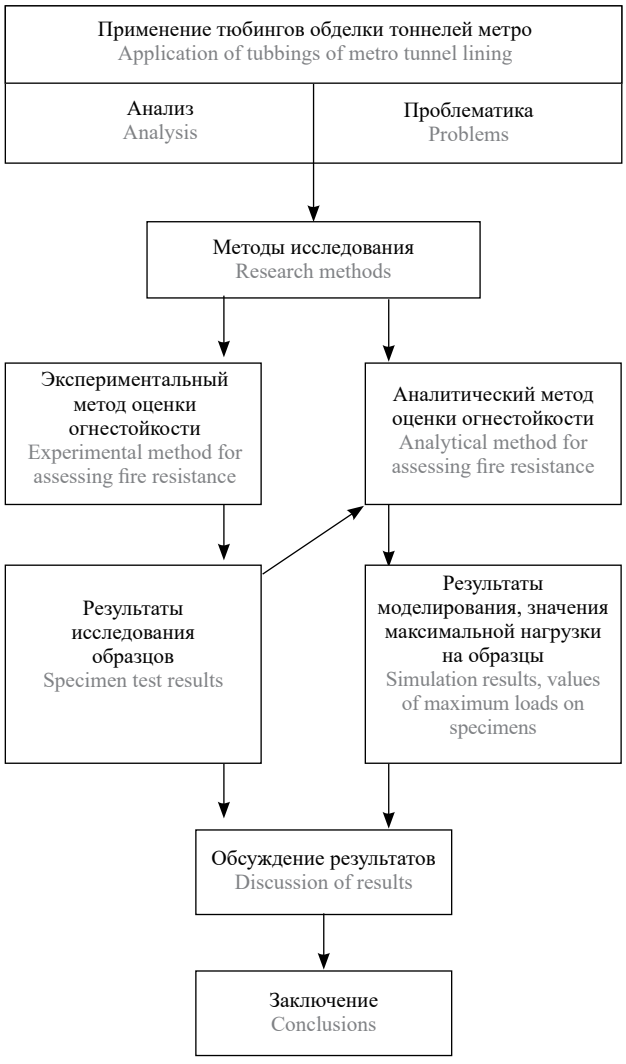


Рис. 4. Блок-схема исследования
Fig. 4. Flow chart of the study

температура в печи и на необогреваемой поверхности объектов исследования, деформация объектов исследования, время появления пламени на необогреваемой поверхности объектов исследования, время появления и характер трещин, отверстий, отслоений, а также другие явления (например, нарушение условий опирания, появление дыма).

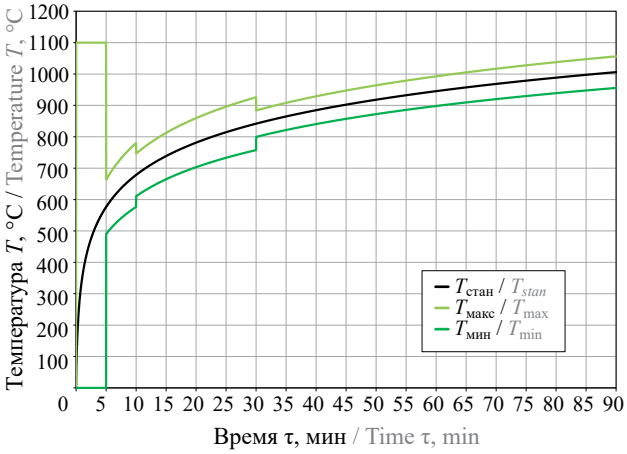


Рис. 5. Зависимость среднеобъемной температуры ($T_{реал}$) в огневой камере печи от времени теплового воздействия на образцы (τ)

Fig. 5. Dependence of the average volume temperature (T_{real}) in the furnace fire chamber on the time of thermal exposure of specimens (τ)

Экспериментальный метод оценки огнестойкости чугунных тюбингов

Для проведения экспериментальной оценки огнестойкости тюбингов обделки тоннелей метро подготавливается образец — фрагмент тюбинга обделки тоннеля метро, представляющего собой единицу продукции, которая используется при сборе полного кольца обделки тоннеля. Фрагмент тюбинга устанавливается в печь для испытаний строительных конструкций на огнестойкость. Для проведения испытаний должны быть обеспечены условия нагружения, приближенные к реальным. Нагрузка на фрагмент тюбинга должна состоять из вертикальной и горизонтальной составляющих. Вертикальная нагрузка моделирует воздействие грунта и других вертикальных воздействий. Горизонтальная нагрузка моделирует напряженно-деформированное состояние, возникающее при работе совместно с другими фрагментами тюбинга обделки тоннелей метро. Для обеспечения горизонтальной нагрузки фрагмент тюбинга фиксируется с одной стороны подвижным упором с гидравлическим домкратом, с другой — шарнирной опорой. При этом подвижный упор с гидравлическим домкратом должны обеспечивать движение только в сторону сжатия тюбинга. Для обеспечения вертикальной нагрузки над фрагментом тюбинга устанавливается траверса, закрепленная к прессу, которая передает нагрузку на спинку тюбинга через стальные пластины. Расположение стальных пластин зависит от конструктивных особенностей фрагмента тюбинга. В случае отсутствия особых требований по передаче нагрузки на спинку тюбинга стальные пластины должны быть расположены на удалении 250 мм от центра спинки тюбинга. Вертикальную и горизонтальную нагрузки должны устанавливать не позднее чем за 30 мин до начала испытания. Схема

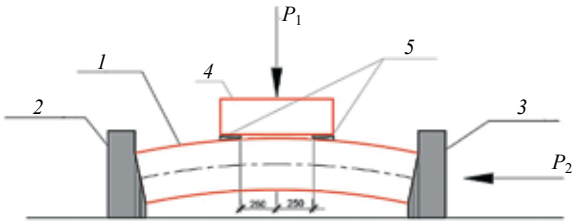


Рис. 6. Схема расположения фрагмента тюбинга и его нагружения: *1* — фрагмент тюбинга; *2* — неподвижный упор; *3* — подвижный упор; *4* — траверса для передачи нагрузки; *5* — стальные пластины; P_1 — вертикальная нагрузка; P_2 — горизонтальная нагрузка

Fig. 6. Scheme of the location of the tubbing fragment and its loading: *1* — tubbing fragment; *2* — fixed stop; *3* — movable stop; *4* — crosshead for load transfer; *5* — steel plates; P_1 — vertical load; P_2 is the horizontal load

нагружения на образец представлена на рис. 6. Величина нагружения образцов представлена в табл. 2.

Для получения дополнительных характеристик для последующей аналитической оценки огнестойкости фрагмента тюбинга обделки тоннелей метро необходима оценка температуры на необогреваемой поверхности тюбинга.

Схема расстановки термоэлектрических преобразователей (ТЭП) на фрагменте тюбинга представлена на рис. 7.

При приложении нагрузки необходимо обеспечить условие неизменяемости схемы, чтобы при деформации конструкции не изменялись условия теплообмена и не оказывалось влияние на определение величины предела огнестойкости.

Испытание проводят до наступления предельного состояния по потере несущей способности вследствие разрушения конструкции или возникновения предельных деформаций. Предельными состояниями по потере несущей способности (*R*) являются:

- максимальное значение горизонтальной деформации образца — *L*/20 мм, где *L* — длина пролета между опорами;
- максимальная скорость нарастания деформаций (см/мин), рассчитывающаяся по формуле $L2/(9000h)$, где *h* — расчетная высота сечения конструкции (толщина плит).

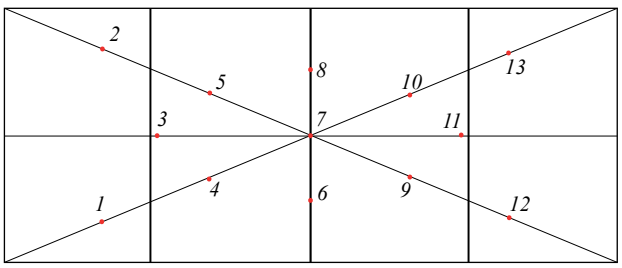


Рис. 7. Схема расположения термоэлектрических преобразователей на необогреваемой поверхности фрагмента тюбинга

Fig. 7. Diagram of the location of thermoelectric transducers on the unheated surface of the tubbing fragment

Таблица 2. Величина нагрузок на образцы
Table 2. Specimen loads

Номер образца Specimen Number	Нагрузка по вертикали, кН Vertical load, kN	Нагрузка по горизонтали, кН Horizontal load, kN
1	392,27*	468,7
2	668,25	592,0
3	980,0**	698,8
4	825,0	813,0

* — предложенная нагрузка соответствует величине, полученной предварительным расчетом как максимально возможная, при которой образец 1 достигает предельного состояния по потере несущей способности спустя 90 мин.
** — предложенная нагрузка соответствует максимальной величине нагружения, создаваемого испытательным оборудованием. Оценка максимальной нагрузки, при которой достигается предельное состояние по потере несущей способности образца 2 спустя 90 мин, будет произведена расчетным путем на основании экспериментальных данных.
* — the proposed load matches to the value obtained by the preliminary calculation as the maximum possible at which specimen 1 reaches the limit state of loss of load-bearing capacity after 90 minutes.
** — the proposed load matches to the maximum load generated by the test equipment. The assessment of the maximum load at which the limit state is reached for the loss of load-bearing capacity of specimen 2 after 90 minutes will be made by calculation on the basis of experimental data.

Значения предельных состояний испытуемых образцов приведены в табл. 3.

В процессе испытаний регистрировались следующие параметры: время наступления предельного состояния; температура в печи, на необогреваемых поверхностях конструкции, а также в других предварительно установленных местах; избыточное давление в печи при испытании конструкций, огнестойкость которых определяется по предельным состояниям; наличие видимых деформаций несущих конструкций; время появления пламени на необогреваемой поверхности; время появления и характер трещин, отверстий, отслоений, а также другие явления (нарушение условий опирания, появление дыма). После полного остывания образца производится обследование состояния образца и измерение его повреждений.

Таблица 3. Предельные состояния образцов по несущей способности
Table 3. Ultimate Capacity Limit States of Specimens

Номер образца Specimen Number	Максимальное значение деформации, мм Maximum deformation value, mm	Максимальная скорость нарастания деформаций, мм/мин Maximum deformation growth rate, mm/min
1	79,5	14
2	86,7	13
3	83,8	9
4	93,6	11

Аналитический метод оценки огнестойкости

Для проведения аналитической оценки огнестойкости тюбингов обделки тоннелей метро используется проектно-вычислительный комплекс, основанный на методе конечных элементов. Программный комплекс выбирается с учетом возможности применения для расчетов задач механики твердого деформируемого тела, устойчивости, динамических и нелинейных процессов, определения собственных и критических частот и форм колебаний, анализа контактных взаимодействий, аэроупругости, а также для решения задач теплопереноса и акустики.

В основу расчета положен метод конечных элементов с использованием в качестве основных неизвестных перемещений и поворотов узлов расчетной схемы. В связи с этим идеализация конструкции выполнена в форме, приспособленной к использованию этого метода, а именно: система представлена в виде набора тел стандартного типа (стержней, пластин, оболочек и т.д.), называемых конечными элементами и присоединенных к узлам.

Тип конечного элемента определяется его геометрической формой, правилами, определяющими зависимость между перемещениями узлов конечного элемента и узлов системы, физическим законом, определяющим зависимость между внутренними усилиями и внутренними перемещениями, и набором параметров (жесткостей), входящих в описание этого закона и другого.

Узел в расчетной схеме метода перемещений представляется в виде абсолютно жесткого тела исчезающе малых размеров. Положение узла в пространстве при деформациях системы определяется координатами центра и углами поворота трех осей, жестко связанных с узлом. Узел представлен как объект, обладающий шестью степенями свободы — тремя линейными смещениями и тремя углами поворота. Статический расчет системы выполняется в линейной постановке.

В качестве исходных данных используются: материал тюбинга, механические свойства материала. 3D-моделирование производится на основе комплекта чертежей с допущениями. Место приложения, схема загружения, граничные условия, а также значения нагрузок определяются согласно утвержденной программе испытаний.

В результате аналитической оценки должна быть получена критическая температура тюбинга и время ее достижения с учетом поведения тюбинга и характера его нагрева при экспериментальной оценке огнестойкости. На основе анализа полученных результатов делается вывод об огнестойкости фрагмента тюбинга, а также производится верификация результатов. При этом возможно проведение дальнейшей аналитической оценки тюбинга аналогичной конструкции при других уровнях нагружения.

Результаты и обсуждение

Экспериментальная оценка огнестойкости тюбингов

В результате проведенных огневых испытаний образцов тюбингов были получены зависимости деформации (рис. 8) и скорости деформации (рис. 9) образцов от времени теплового воздействия. Также были получены данные об изменении температуры на необогреваемой поверхности образцов в ходе испытаний. На рис. 10 приведена зависимость средней температуры на необогреваемой поверхности в зависимости от времени теплового воздействия.

В табл. 4 приведено время достижения предельного состояния по деформации образцами тюбингов.

На рис. 11–18 приведены фотографии образцов до и после огневого воздействия.

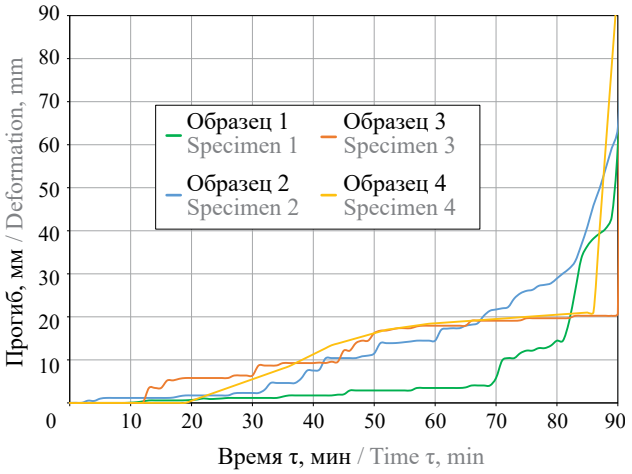


Рис. 8. Зависимость деформации образцов от времени теплового воздействия
Fig. 8. Dependence of deformation of specimens on the time of heat exposure

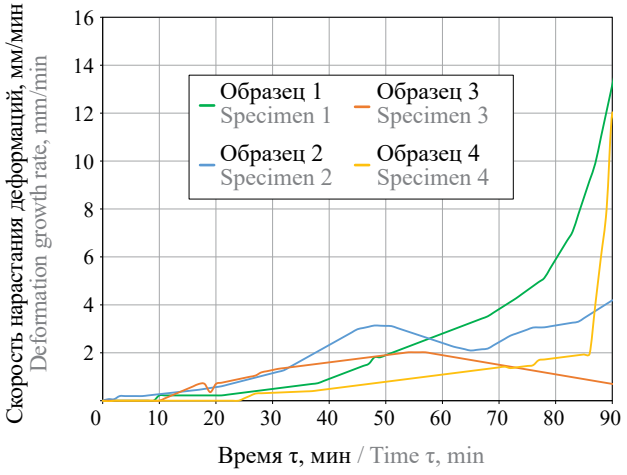


Рис. 9. Зависимость скорости деформации образцов от времени теплового воздействия
Fig. 9. Dependence of the rate of deformation of specimens on the time of heat exposure

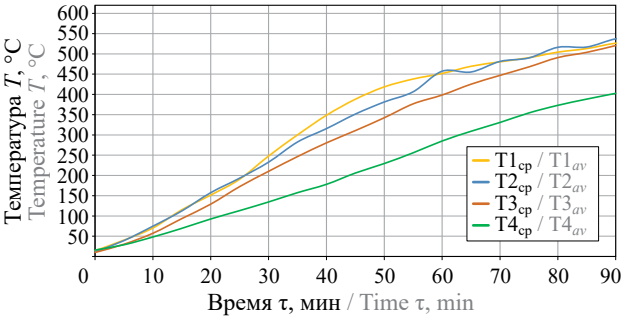


Рис. 10. Зависимость средней температуры на необогреваемой поверхности образца, полученной исходя из данных, полученных термопарами (1)–(13), установленными на необогреваемой поверхности образцов, от времени теплового воздействия
Fig. 10. Dependence of the mean temperature on the unheated surface of the specimen, obtained on the basis of the data obtained by thermocouples (1)–(13) installed on the unheated surface of the specimens, on the time of heat exposure

Таблица 4. Время достижения предельного состояния
Table 4. Time to reach the limit state

Номер образца Specimen Number	Время достижения предельного состояния, мин Time to reach the limit state, min
1	91
2	Не менее 90 / No less than 90
3	90
4	90

Рис. 11. Фото образца № 1 до теплового воздействия
Fig. 11. Photo of specimen No. 1 before heat exposure

Рис. 12. Фото образца № 1 после теплового воздействия
Fig. 12. Photo of specimen No. 1 after heat exposure

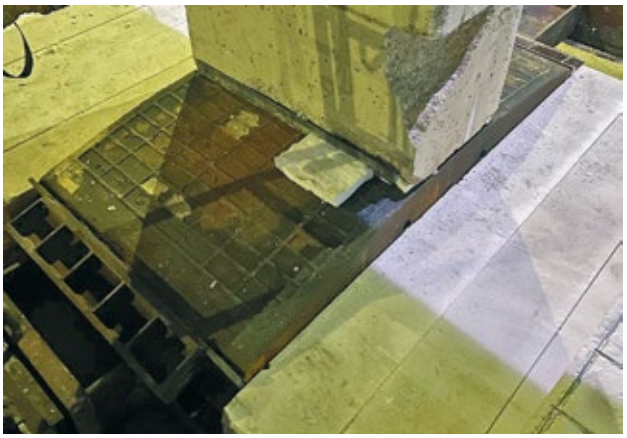


Рис. 13. Фото образца № 2 до теплового воздействия
Fig. 13. Photo of specimen No. 2 before heat exposure

Рис. 14. Фото образца № 2 после теплового воздействия
Fig. 14. Photo of specimen No. 2 after heat exposure

Рис. 15. Фото образца № 3 до теплового воздействия
Fig. 15. Photo of specimen No. 3 before heat exposure

Рис. 16. Фото образца № 3 после теплового воздействия
Fig. 16. Photo of specimen No. 3 after heat exposure

Рис. 17. Фото образца № 4 до теплового воздействия
Fig. 17. Photo of specimen No. 4 before heat exposure

Рис. 18. Фото образца № 4 после теплового воздействия
Fig. 18. Photo of specimen No. 4 after heat exposure

Аналитическая оценка огнестойкости тюбингов
Исходные данные

В качестве материала тюбинга в расчетной модели применялся чугун СЧ20. Общий вид тюбинга приведен на рис. 19.

Расчет модели производился в ПК ЛИРА 10 с использованием Nastran In-CAD.

В расчетной модели применялся ряд допущений:

- ребра жесткости по периметру приняты толщиной 40 мм (фактическая толщина переменная и варьируется в диапазоне от 30 до 34 мм);
- центральное продольное ребро жесткости принято толщиной 40 мм (фактическая толщина переменная и варьируется в диапазоне от 34 до 40 мм);
- конструктивные отверстия в ребрах жесткости тюбинга исключены из расчета.

Таблица 5. Нагрузки на образец 3
Table 5. Loads on specimen 3

Характеристика Characteristic	Значение Value
Нагрузка по вертикали, кН Vertical load, kN	1684,0
Нагрузка по горизонтали, кН Horizontal load, kN	698,8
Ускорение свободного падения, м/с² Acceleration due to gravity, m/s²	9,80665

Нагрузки и воздействия на тюбинг определены согласно табл. 5.

Схема приложения нагрузок соответствует натурным испытаниям.

Характеристики чугуна СЧ20 в соответствии с ГОСТ[1] приведены в табл. 6.

Для расчетной модели приняты следующие характеристики:

- твердость материала: НВ 10 –1 = 143 — 255 МПа;
- предел прочности — 275,79 МПа;
- предел текучести — 213,74 МПа.

Рис. 20. Граничные условия в первой опоре
Fig. 20. Boundary conditions in the first support

Рис. 21. Граничные условия во второй опоре
Fig. 21. Boundary conditions in the second support

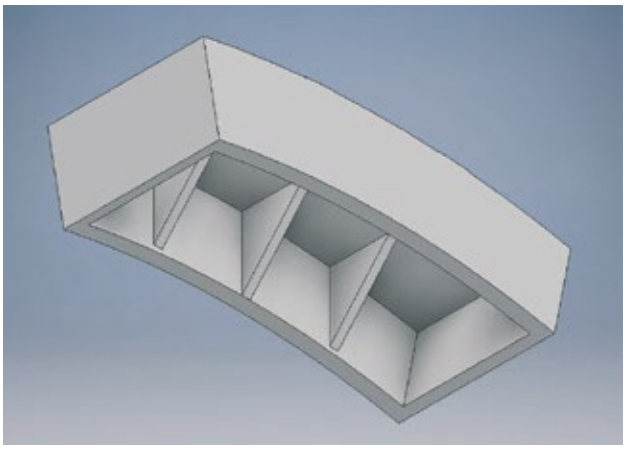


Рис. 19. Общий вид конструкции
Fig. 19. General view of the structure

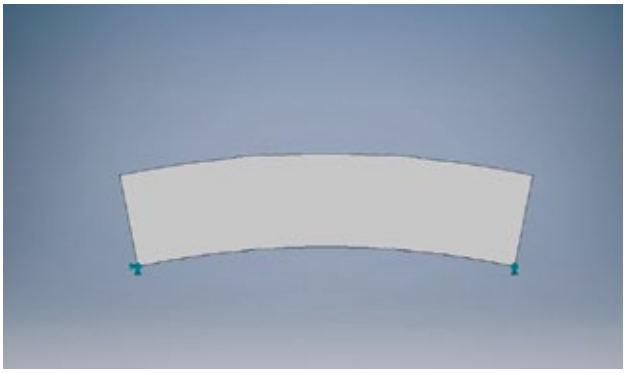


Рис. 22. Общая схема опирания
Fig. 22. General reliance scheme

Таблица 6. Характеристики чугуна СЧ20
Table 6. Characteristics of cast-iron SCh20

Свойства чугуна СЧ20 Properties of cast-iron SCh20						
Механические при T = 20 °C Mechanical at T = 20 °C	Физические при T_1 Physical at T_1					
σ_s, МПа σ_s, MPa	T_1, °C	$E \cdot 10^6$, МПа $E \cdot 10^6$, MPa	$a \cdot 10^6$, 1/град $a \cdot 10^6$, 1/ deg	I, Вт/(м·град) I, W/(m·deg)	r, кг/м³ r, kg/m³	C, Дж/(кг·град) C, J/(kg·deg)
200	20	1	–	54	7100	–
	100	–	9,5	–	–	480

[1] ГОСТ 1412–85. Чугун с пластинчатым графитом для отливок. Марки (утв. постановлением Государственного комитета СССР по стандартам от 24 сентября 1985 г. № 3009).

Тюбинг шарнирно оперт на два ребра жесткости (рис. 20). По одной опоре разрешены горизонтальные перемещения, согласно приведенной схеме опирания (рис. 21).

Нагрузки приложены к поверхностям модели согласно приложенной схеме (рис. 22, 23).

Результаты расчета

Вид сетки конечных элементов тюбинга представлен на рис. 24. Внутренние напряжения в тюбинге представлены на рис. 25. Схема перемещений тюбинга представлена на рис. 26. Схема деформаций тюбинга представлена на рис. 27. Карта зон разрушения материала в модели тюбинга представлена на рис. 28.

Согласно проведенному анализу, несущая способность конструкции обеспечена.

Теплофизическая задача

По результатам расчетов без термического воздействия образец № 3 сохраняет свою несущую способность при приложении к нему вертикальной нагрузки в 980 кН и горизонтальной в 698,8 кН. Условие прочности выполняется:

$$\sigma = \frac{M}{W} + \frac{N}{A} = \frac{2\ 582\ 312{,}69}{17\ 680{,}433} + \frac{82\ 313{,}86}{795} \approx 249{,}6\ \text{кгс/см}^2 < \sigma_в = 2000\ \text{кгс/см}^2$$

где M — максимальный изгибающий момент;

W — момент сопротивления;

N — продольная сила в сечении с максимальным изгибающим моментом;

A — площадь сечения;

$\sigma_в$ — предел кратковременной прочности.

При оказании на образец термического воздействия его прочностные характеристики уменьша-

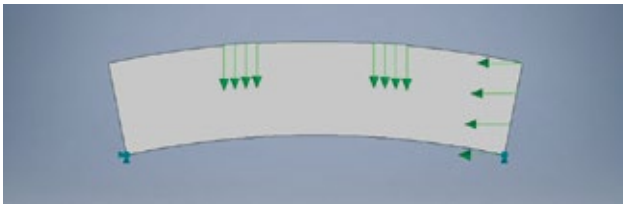


Рис. 23. Схема приложения нагрузок
Fig. 23. Load application scheme

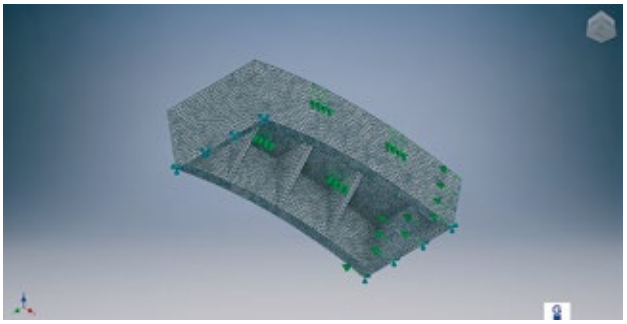


Рис. 24. Вид сетки конечных элементов
Fig. 24. Finite element mesh view

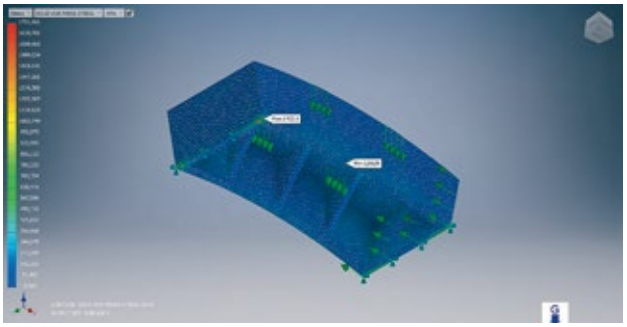


Рис. 25. Внутренние напряжения, МПа
Fig. 25. Internal stresses, MPa

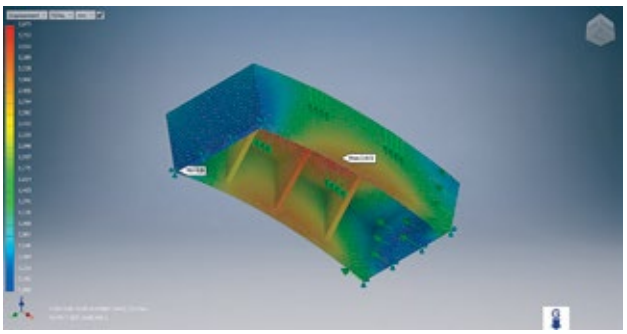


Рис. 26. Схема перемещений
Fig. 26. Movement scheme

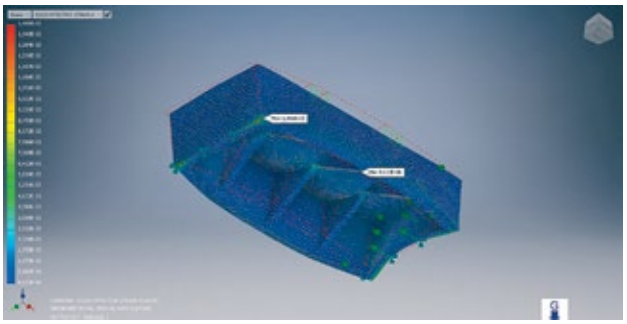


Рис. 27. Схема деформаций
Fig. 27. Scheme of deformations

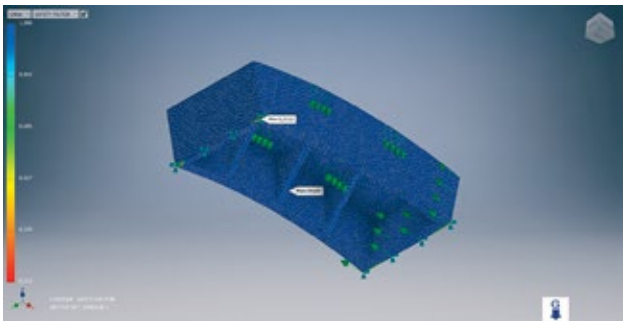


Рис. 28. Карта зон разрушения материала в модели
Fig. 28. Map of material failure zones in the model

ются. Решая статическую задачу огнестойкости, получим γ_{tem} — коэффициент, учитывающий изменение прочности стали при нагреве:

$$\gamma_{tem} = \frac{M}{W_{pl} \cdot R_{yn}} = \frac{253,32}{0,0198 \cdot 200\,000} = 0,064,$$

где M — максимальный изгибающий момент;

W — пластический момент сопротивления;

$R_{уп}$ — предел прочности к разрыву.

Критическая температура, при которой он сохраняет несущую способность для данного нагружения:

$$t_{cr} = \left(750 - 440 \cdot \gamma_{tem}\right) \cdot k =$$

$$= \left(750 - 440 \cdot 0,064\right) \cdot 0,92 = 664\,^{\circ}\text{C},$$

где k — поправочный коэффициент.

Согласно лабораторным данным, максимальная температура образца в ходе исследования составляла 594 °С, что меньше, чем критическая температура для данного вида нагружения, а значит условие прочности при термическом воздействии выполняется.

Повторим расчет, увеличив вертикальную нагрузку до значения в 1684 кН, горизонтальная остается прежней. Предел кратковременной прочности при таком нагружении не превышен. Условие прочности выполняется:

$$\sigma = \frac{M}{W} + \frac{N}{A} = \frac{4\,496\,019,69}{17\,680,433} +$$

$$+ \frac{90\,012,68}{795} \approx 367,5 \text{ кгс/см}^2 < \sigma_{в} =$$

$$= 2000 \text{ кгс/см}^2$$

где M — максимальный изгибающий момент;

W — момент сопротивления;

N — продольная сила в сечении с максимальным изгибающим моментом;

A — площадь сечения;

$\sigma_{в}$ — предел кратковременной прочности.

При оказании на образец термического воздействия его прочностные характеристики уменьшаются. Решая статическую задачу огнестойкости, получим γ_{tem} — коэффициент, учитывающий изменение прочности стали при нагреве:

$$\gamma_{tem} = \frac{M}{W_{pl} \cdot R_{yn}} = \frac{441,06}{0,0198 \cdot 200\,000} = 0,111,$$

где M — максимальный изгибающий момент;

W — пластический момент сопротивления;

$R_{уп}$ — предел прочности к разрыву.

Критическая температура, при которой он сохраняет несущую способность для данного нагружения:

$$t_{cr} = \left(750 - 440 \cdot \gamma_{tem}\right) \cdot k =$$

$$= \left(750 - 440 \cdot 0,111\right) \cdot 0,92 = 645\,^{\circ}\text{C},$$

где k — поправочный коэффициент.

Согласно лабораторным данным, максимальная температура образца в ходе исследования составляла 594 °С, что меньше, чем критическая температура для данного вида нагружения, а значит условие прочности при термическом воздействии выполняется. Соответственно, образец 3 обеспечивает предел огнестойкости *R*90 при воздействии нагрузки 1684 кН по вертикали и 813,0 кН по горизонтали.

Аналогичным способом был проведен расчет предельных нагрузок на образец 4. Образец 3 обеспечивает предел огнестойкости *R*90 при воздействии нагрузки 1651 кН по вертикали и 813,0 по горизонтали.

Исходя из данных, полученных в результате проведенного исследования, мы получили информацию о действительных нагрузках, в результате которых исследуемые образцы обеспечивают огнестойкость в течение 90 мин. На основании информации о температуре на необогреваемой поверхности образцов, а также с использованием теплофизических расчетов видно, что предельное состояние по потере несущей способности спустя 90 мин наступало при температурах около +645–665 °С. В связи с тем, что чугун имеет высокую теплопроводность и толщина покрытия и ребер жесткости образцов незначительно влияют на характер нагрева.

Из литературы известно, что одной из характерных зависимостей в области огнестойкости строительных конструкций является зависимость характера сечения конструкции от времени достижения предельного состояния. Одним из способов описания сечения конструкции является приведенная толщина сечения, равная отношению площади сечения к обогреваемому периметру.

Для исследуемых образцов была произведена оценка приведенной толщины сечения (табл. 7),

Таблица 7. Сводные данные по предельным нагрузкам на образцы

Table 7. Summary of specimen load limits

Номер образца Specimen Number	Нагрузка по вертикали, кН Vertical load, kN	Нагрузка по горизонтали, кН Horizontal load, kN	Приведенная толщина сечения, мм Effective section thickness, mm
1	392,27	468,7	28
2	668,25	592,0	39
3	1684	698,8	58
4	1791	813,0	61

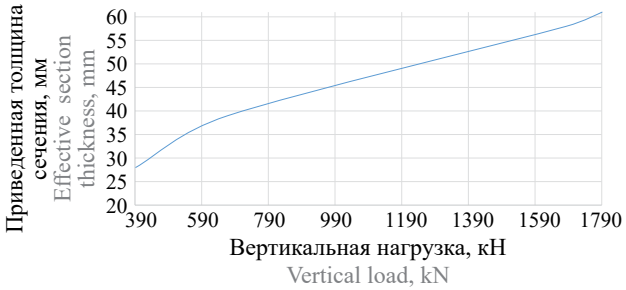


Рис. 29. Зависимость величины вертикальной нагрузки на образцы от приведенной толщины сечения
Fig. 29. Dependence of the value of the vertical load on the specimens on the effective thickness of the section

а также получена зависимость величины вертикальной нагрузки на образцы от приведенной толщины сечения (рис. 29).

На основании графика зависимости величины вертикальной нагрузки на образцы от приведенной толщины сечения можно выразить математическую зависимость:

$$y = 2 \cdot 10^{-8} \cdot x^3 - 6 \cdot 10^{-5} \cdot x^3 + 0,0934x + 0,2812.$$

Приведенная зависимость может быть использована для предварительной оценки огнестойкости тюбингов обделки тоннелей метро.

Заключение

Проведено исследование поведения чугунных тюбингов обделки тоннелей метро в условиях высокотемпературного воздействия. Для исследования были разработаны методики огневых испытаний тюбингов обделки тоннелей метро, а также аналитической оценки их огнестойкости, в которых учитываются особенности поведения выбранных конструкций — горизонтальные и вертикальные нагрузки и возможность прогрева при высокотемпературном воздействии.

В рамках проводимых исследований были проведены натурные испытания фрагментов чугунных тюбингов обделки тоннелей метро, зафиксированы предельные состояния исследуемых конструкций, а также проведен анализ поведения образцов тюбингов обделки тоннелей метро. Получены зависимости деформации и прогрева образцов в зависимости от времени огневого воздействия.

Получены величины предельных нагрузок на исследуемые образцы, при которых спустя 90 мин после начала огневого воздействия достигается предельное состояние по потере несущей способности с использованием разработанных аналитических методов исследования.

Получена зависимость величины предельной вертикальной нагрузки на образцы, при которой достигается предельное состояние по потере несущей способности, от приведенной толщины сечения тюбингов обделки тоннелей метро, выражаемая в виде математической зависимости.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. *Wei Shi, Zenglin Hong, Min Yang, Ning Li, Tianxiang Tan.* Impact of subway shield tunnel construction on deformation of existing utility tunnel // Frontiers in Earth Science. 2023. No. 11. P. 1104865. DOI: 10.3389/feart.2023.1104865
2. *Demenkov P., Shubin A.A.* Improvement of design, geomechanical substantiation and development of construction technologies for the closed column station type of the deep-laid subway // International Journal of Applied Engineering Research. 2016. Vol. 11. No. 3. Pp. 1754–176. EDN WWEMJZ.
3. *Zhou Qihui, Zhang Qiongfang, Sun Miaomiao, Huang Xin, Huang Zhanggong, Wen Xuewei et al.* Measuring Vibrations of Subway Tunnel Structures with Cracks // Buildings. 2024. Vol. 14. No. 9. P. 2660. DOI: 10.3390/buildings14092660
4. *Bao Yan, Zheng Yexin, Tang Chao, Meng Xiaolin, Sun Zhe, Zhang Dongliang.* Lateral convergence deformation prediction of subway shield tunnel based on Kalman model // Sustainability. 2024. No. 16. P. 2798. DOI: 10.20944/preprints202401.0398.v1
5. *Dong Sihui, Zhang Xinyu, Wang Kang.* Study on fire ventilation control of subway tunnel: a case study for Dalian subway // Sustainability. 2022. Vol. 14. No. 14. DOI: 10.3390/su14148695
6. *Конопляник А.Ю., Ильев И.М.* Исследование характеристик жаростойких бетонов с добавками вспученного перлитового песка // Металлургическая и горнорудная промышленность. 2019. № 1–2. С. 62–66. DOI: 10.33101/s001-150002091
7. *Akhlaq Muhammad, Moiz Muhammad, Ahmed Shehryar.* A review of concrete's performance under the influence of fire and remedial solutions // 1st International Conference on Engineering and Applied Natural Sciences (ICEANS). Konya, Turkey, 2022.
8. *Elsayd Alaa, Fathy Islam.* Experimental Study of fire effects on compressive strength of normal-strength concrete supported with nanomaterials additives // IOSR Journal of Engineering (IOSRJEN). 2019. Vol. 16. Issue 1. Pp. 28–37. DOI: 10.9790/1684-1601032837

9. *Agrawal Dr.* Exploration and comparison between regular concrete and concrete with mineral additives // Interantional journal of scientific research in engineering and management. 2024. No. 08. Pp. 1–5. DOI: 10.55041/IJSREM33980
10. *Golovanov V., Pehotikov A., Gravit M., Novikov N., Pavlov V.* Influence of microfiber on fire resistance of reinforced concrete tunnel tubings // Safety In Aviation And Space Technologies. Select Proceedings of the 9th World Congress "Aviation in the XXI Century". "Lecture Notes in Mechanical Engineering" Cham, 2022. DOI: 10.1007/978-3-030-85057-9_24. EDN GLQZNM.
11. *Annerel E., Boch K., Lemaire T.* Passive fire protection end life safety // Topic Safety of Tunnel and Underground Structure. "SEE Tunnel: Promoting in SEE Region" ITA WTS 2015 Congress and 41st General Assambly. Dubrovnik, Croatia, 2015. Pp. 1–10.
12. *Maraveas C., Vrakas A.A.* Design of concrete tunnel linings for fire safety // Structural Engineering International. 2014. Vol. 24. Issue 3. Pp. 319–329. DOI: 10.2749/101686614X13830790993041
13. *Cong Wei, Shi Long, Shi Zhicheng, Peng Min, Yang Hui, Zhang Shaogang et al.* Effect of train fire location on maximum smoke temperature beneath the subway tunnel ceiling // Tunnelling and Underground Space Technology. 2020. No. 97. P. 103282. DOI: 10.1016/j.tust.2020.103282
14. *Kordina K.* Brände in unterirdischen Verkehrsanlagen // Bautechnik. 2003. Nr. 80. Heft 5. Pp. 327–338. DOI: 10.1002/bate.200302620
15. *Ruiz López Agustin, Tsiampousi Aikaterini, Standing Jamie, Potts David.* The influence of tunnel joints on the present-day condition of a grey cast iron tunnel // Computers and Geotechnics. 2023. P. 105701. DOI: 10.1016/j.compgeo.2023.105701
16. *Kropivnyi V., Bosyi M., Kuzyk O., Kropivna A., Molokost L.* On the question of structural formation of high-compression cast iron using state diagrams system "Fe-Si", "Mg-Si" and "Fe-Si-Mg" // Central Ukrainian Scientific Bulletin. Technical Sciences. 2023. No. 2. Pp. 34–42. DOI: 0.32515/2664-262X.2023.7(38).2.34-42
17. *Sosnovskiy L., Sherbakov S.* New cast iron Monica loses its brittleness with increasing strength // International Journal of Materials and Structural Integrity. 2023. No. 15. Pp. 24–41. DOI: 10.1504/IJMSI.2023.135888
18. *Sirenko K.A.* Directions for the development of a methodology for regulating the chemical composition and properties of cast iron in foundry production based on a probabilistic approach // Metaloznavstvo ta obrobka metalìv. 2023. No. 29. Pp. 23–33. DOI: 10.15407/mom2023.04.023
19. *Panichkin A., Kenzhegulov A., Mamaeva A., Uskenbayeva A., Kshibekova B., Imbarova A. et al.* Effect of carbon and cooling rate on the structure of hypereutectic high chromium cast iron in the cast state and after heat treatment // J. Compos. Sci. 2023. Vol. 7. Issue. 12. P. 483. DOI: 10.3390/jcs7120483
20. *Chen C., Wang J., Ge Y., Zhuang M., Ma Z.* Microstructure and wear resistance of high-chromium cast iron with multicomponent carbide coating via laser cladding // Coatings. 2023. No. 13. P. 1474. DOI: 10.3390/coatings13081474
21. *Mingjian Peng, Hongbing Liu, Yang Xuan, Xu Liu, Lei Xu, Zhishui Yu.* Evaluation of the microstructural and mechanical properties of ductile cast iron and alloy steel dissimilar materials welded by magnetically impelled arc butt // Journal of Materials Research and Technology. 2021. Vol. 15. Pp. 4623–4635. DOI: 10.1016/j.jmrt.2021.10.059
22. *Fischer G., Nellesen J., Anar N.B., Ehrig K., Riesemeier H., Tillmann W.* 3D analysis of micro-deformation in VHCF-loaded nodular cast iron by μCT // Materials Science and Engineering: A. 2013. Vol. 577 (4). Pp. 202–209. DOI: 10.1016/j.msea.2013.04.057
23. *Liu H.* Damage of cast-iron subway tunnels under internal explosions // Geotechnical Special Publication. 2011. Pp. 1524–1533. DOI: 10.1061/41165(397)156
24. *Liu Huabei.* Soil-structure interaction and failure of cast-iron subway tunnels subjected to medium internal blast loading // Journal of Performance of Constructed Facilities. 2012. No. 26. Pp. 691–701. DOI: 10.1061/(ASCE)CF.1943-5509.0000292
25. *Dehn F., Werther N., Knitl J.* Groβbrandversuche fur den city-tunnel Leipzig // Beton- und Stahlbetonbau. 2006. Nr. 101. Heft 8. Pp. 631–636. DOI: 10.1002/best200608186
26. *Голованов В.И., Пехотиков А.В., Павлов В.В., Новиков Н.С.* Огневые испытания тюбингов тоннельной обделки // Пожарная безопасность. 2019. № 4 (97). С. 50–55. DOI: 10.22227/0869-7493.2022.31.01.21-39. EDN FELKLH.
27. *Голованов В.И., Пехотиков А.В., Новиков Н.С., Павлов В.В., Кузнецова Е.В.* Огнестойкость железобетонных тюбингов подземных сооружений с полипропиленовой фиброй // Пожаровзрывобезопасность/Fire and Explosion Safety. 2019. Т. 28. № 5. С. 60–70. DOI: 10.18322/PVB.2019.28.05.60-70. EDN CDPGLL.
28. *Голиков А.Д., Черкасов Е.Ю., Данилов А.И., Сиваков И.А.* Предел огнестойкости конструкций чугунных тоннельных обделок метрополитена без огнезащитных покрытий // Пожаровзрывобезопасность/Fire and Explosion Safety. 2014. Т. 23. № 12. С. 20–27. EDN VUBAKH.
29. *Gravit M., Antonov S., Nedryshkin O.* Research features of tunnel linings with innovations fireproof panels // Procedia Engineering. 2016. No. 165. Pp. 1651–1657. DOI: 10.1016/j.proeng.2016.11.906

30. *Гаращенко А.Н., Антонов С.П., Марченкова С.В., Павлов В.В.* Теплотехнический анализ результатов огневых испытаний под нагрузкой чугунных тюбингов обделок тоннелей метрополитена, обеспечение их рациональной огнезащиты и заданной огнестойкости // Пожаровзрывобезопасность/Fire and Explosion Safety. 2022. № 31. С. 21–39. DOI: 10.22227/0869-7493.2022.31.01.21-39. EDN VSXTGY.
31. *Голиков А.Д., Черкасов Е.Ю., Данилов А.И., Сиваков И.А.* Способ огнезащиты обделки транспортных тоннелей из чугунных тюбингов // Пожаровзрывобезопасность/Fire and Explosion Safety. 2016. № 25 (12). С. 22–29. DOI: 10.18322/PVB.2016.25.12.22-29

REFERENCES

1. Wei Shi, Zenglin Hong, Min Yang, Ning Li, Tianxiang Tan. Impact of subway shield tunnel construction on deformation of existing utility tunnel. *Frontiers in Earth Science*. 2023; 11:1104865. DOI: 10.3389/feart.2023.1104865
2. Demenkov P., Shubin A.A. Improvement of design, geomechanical substantiation and development of construction technologies for the closed column station type of the deep-laid subway. *International Journal of Applied Engineering Research.* 2016; 11(3):1754-1761. EDN WWEMJZ.
3. Zhou Qihui, Zhang Qiongfang, Sun Miaomiao, Huang Xin, Huang Zhanggong, Wen Xuewei et al. Measuring vibrations of subway tunnel structures with cracks. *Buildings.* 2024; 14(9):2660. DOI: 10.3390/buildings14092660
4. Bao Yan, Zheng Yexin, Tang Chao, Meng Xiaolin, Sun Zhe, Zhang Dongliang et al. Lateral convergence deformation prediction of subway shield tunnel based on Kalman model. *Sustainability.* 2024; 16:2798. DOI: 10.20944/preprints202401.0398.v1
5. Dong Sihui, Zhang Xinyu, Wang Kang. Study on fire ventilation control of subway tunnel: a case study for Dalian subway. *Sustainability*. 2022; 14(14). DOI: 10.3390/su14148695
6. Konoplianyk A.Yu., Iliev I.M. Research of characteristics of heat-resistant concretes with additives of expanded perlite sand. *Metallurgical and mining industry*. 2019; 1-2:62-66. DOI: 10.33101/s001-150002091 (rus).
7. Akhlaq Muhammad, Moiz Muhammad, Ahmed Shehryar. A review of concrete's performance under the influence of fire and remedial solutions. *Conference: 1st International Conference on Engineering and Applied Natural Sciences (ICEANS).* Konya, Turkey, 2022.
8. Elsayd Alaa, Fathy Islam. Experimental Study of fire effects on compressive strength of normal-strength concrete supported with nanomaterials additives. *IOSR Journal of Engineering (IOSRJEN)*. 2019; 16(1. III):28-37. DOI: 10.9790/1684-1601032837.
9. Agrawal Dr. Exploration and comparison between regular concrete and concrete with mineral additives. *Interantional journal of scientific research in engineering and management.* 2024; 8:1-5. DOI: 10.55041/IJSREM33980
10. Golovanov V., Pehotikov A., Gravit M., Novikov N., Pavlov V. Influence of microfiber on fire resistance of reinforced concrete tunnel tubings. *Safety in Aviation and Space Technologies. Select Proceedings of the 9th World Congress "Aviation in the XXI Century". Series "Lecture Notes in Mechanical Engineering" Cham*. 2022. DOI: 10.1007/978-3-030-85057-924. EDN GLQZNM.
11. Annerel E., Boch K., Lemaire T. Passive fire protection end life safety. *Topic Safety of Tunnel and Undeground Structure. "SEE Tunnel: Promoting in SEE Region" ITA WTS 2015 Congress and 41st General Assambly*. Dubrovnik, Croatia, 2015; 1-10.
12. Maraveas C., Vrakas A.A. Design of concrete tunnel linings for fire safety. *Structural Engineering International.* 2014; 24(3):319-329. DOI: 10.2749/101686614X13830790993041
13. Cong Wei, Shi Long, Shi Zhicheng, Peng Min, Yang Hui, Zhang Shaogang et al. Effect of train fire location on maximum smoke temperature beneath the subway tunnel ceiling. *Tunnelling and Underground Space Technology*. 2020; 97:103282. DOI: 10.1016/j.tust.2020.103282.
14. Kordina K. Brände in unterirdischen Verkehrsanlagen. *Bautechnik*. 2003; 80(5):327-338. DOI: 10.1002/bate.200302620 (ger).
15. Ruiz López Agustin, Tsiampousi Aikaterini, Standing Jamie, Potts David. The influence of tunnel joints on the present-day condition of a grey cast iron tunnel. *Computers and Geotechnics*. 2023; 105701. DOI: 10.1016/j.compgeo.2023.105701
16. Kropivnyi V., Bosyi M., Kuzyk O., Kropivna A., Molokost L. On the question of structural formation of high-compression cast iron using state diagrams system "Fe-Si", "Mg-Si" and "Fe-Si-Mg". *Central Ukrainian Scientific Bulletin. Technical Sciences.* 2023; 2:34-42. DOI: 0.32515/2664-262X.2023.7(38).2.34-42
17. Sosnovskiy L., Sherbakov S. New cast iron Monica loses its brittleness with increasing strength. *International Journal of Materials and Structural Integrity*. 2023; 15:24-41. DOI: 10.1504/IJMSI.2023.135888
18. Sirenko K.A. Directions for the development of a methodology for regulating the chemical composition and properties of cast iron in foundry production based on a probabilistic approach. *Metaloznavstvo ta obrobka metalìv*. 2023; 29:23-33. DOI: 10.15407/mom2023.04.023
19. Panichkin A., Kenzhegulov A., Mamaeva A., Uskenbayeva A., Kshibekova B., Imbarova A. et al. Effect of carbon and cooling rate on the structure of hypereutectic high chromium cast iron in the cast state and after heat treatment. *J. Compos. Sci*. 2023; 7(12):483. DOI: 10.3390/jcs7120483

20. Chen C., Wang J., Ge Y., Zhuang M., Ma Z. Microstructure and wear resistance of high-chromium cast iron with multicomponent carbide coating via laser cladding. *Coatings.* 2023; 13:1474. DOI: 10.3390/coatings13081474
21. Mingjian Peng, Hongbing Liu, Yang Xuan, Xu Liu, Lei Xu, Zhishui Yu. Evaluation of the microstructural and mechanical properties of ductile cast iron and alloy steel dissimilar materials welded by magnetically impelled arc butt. *Journal of Materials Research and Technology.* 2021; 15:4623-4635. DOI: 10.1016/j.jmrt.2021.10.059
22. Fischer G., Nellesen J., Anar N.B., Ehrig K., Riesemeier H., Tillmann W. 3D analysis of micro-deformation in VHCF-loaded nodular cast iron by μCT. *Materials Science and Engineering: A*. 2013; 577(4):202-209. DOI: 10.1016/j.msea.2013.04.057
23. Liu H. Damage of cast-iron subway tunnels under internal explosions. *Geotechnical Special Publication.* 2011; 1524-1533. DOI: 10.1061/41165(397)156
24. Liu Huabei. Soil-structure interaction and failure of cast-iron subway tunnels subjected to medium internal blast loading. *Journal of Performance of Constructed Facilities.* 2012; 26:691-701. DOI: 10.1061/(ASCE)CF.1943-5509.0000292
25. Dehn F., Werther N., Knitl J. Groβbrandversuche fur den city-tunnel Leipzig. *Beton- und Stahlbetonbau*. 2006; 101(8):631-636. DOI: 10.1002/best200608186 (ger).
26. Golovanov V.I., Pekhotikov A.V., Pavlov V.V., Novikov N.S. Fire tests of tubings of tunnel lining. *Fire safety*. 2019; 4(97):50-55. DOI: 10.22227/0869-7493.2022.31.01.21-39. EDN FELKLH. (rus).
27. Golovanov V.I., Pekhotikov A.V., Novikov N.S., Pavlov V.V., Kuznetsova E.V. Fire resistance of reinforced concrete tubbings of underground structures with polypropylene fiber. *Pozharovzryvobezopasnost'/Fire and Explosion Safety*. 2019; 28(5):60-70. DOI: 10.18322/PVB.2019.28.05.60-70. EDN CDPGLL. (rus).
28. Golikov A.D., Cherkasov E.Yu., Danilov A.I., Sivakov I.A. Fire resistance limit of cast-iron tunnel lining structures of the metro without fire protection coatings. *Pozharovzryvobezopasnost'/Fire and Explosion Safety.* 2014; 23(12):20-27. EDN VUBAKH. (rus).
29. Gravit M., Antonov S., Nedryshkin O. Research features of tunnel linings with innovations fireproof panels. *Procedia Engineering.* 2016; 165:1651-1657. DOI: 10.1016/j.proeng.2016.11.906
30. Garashchenko A., Danilov A., Antonov S., Marchenkova S., Pavlov V. The thermal analysis of fire test results obtained for loaded cast iron tubing used to line subway tunnels, their rational fire protection and pre-set fire resistance. *Pozharovzryvobezopasnost/Fire and Explosion Safety.* 2022; 31:21-39. DOI: 10.22227/0869-7493.2022.31.01.21-39. EDN VSXTGY (rus).
31. Golikov A.D., Cherkasov E.Yu., Danilov A.I., Sivakov I.A. Method of fire protection for lining transport tunnels made of cast iron tubbings. *Pozharovzryvobezopasnost'/Fire and Explosion Safety.* 2016; 25(12):22-29. DOI: 10.18322/PVB.2016.25.12.22-29 (rus).

Поступила 01.10.2024, после доработки 04.10.2024;
принята к публикации 07.10.2024
Received October 1, 2024; Received in revised form October 04, 2024;
Accepted October 7, 2024

Информация об авторах

КОРОЛЬЧЕНКО Дмитрий Александрович, д.т.н., доцент, заведующий кафедрой «Комплексная безопасность в строительстве», Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет, Россия, 129337, г. Москва, Ярославское шоссе, 26; РИНЦ ID: 352067; Scopus AuthorID: 55946060600; ResearcherID: E-1862-2017; ORCID: 0000-0002-2361-6428; e-mail: KorolchenkoDA@mgsu.ru

ПОРТНОВ Федор Александрович, к.т.н., доцент кафедры «Комплексная безопасность в строительстве», Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет, Россия, 129337, г. Москва, Ярославское шоссе, 26; РИНЦ ID: 1134480; Scopus AuthorID: 57192372795; ResearcherID: AAD-9374-2019; ORCID: 0000-0001-7409-0844; e-mail: PortnovFA@mgsu.ru

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

Information about the authors

Dmitriy A. KOROLCHENKO, Dr. Sci. (Eng.), Docent, Head of Institute of Complex Safety in Construction, Moscow State University of Civil Engineering (National Research University), Yaroslavskoe Shosse, 26, Moscow, 129337, Russian Federation; ID RISC: 352067; Scopus AuthorID: 55946060600; ResearcherID: E-1862-2017; ORCID: 0000-0002-2361-6428; e-mail: ikbs@mgsu.ru

Fedor A. PORTNOV, Cand. Sci. (Eng.), Associate professor at the Department of Integrated Safety in Civil Engineering, Moscow State University of Civil Engineering (National Research University), Yaroslavskoe Shosse, 26, Moscow, 129337, Russian Federation; РИНЦ ID: 1134480; Scopus AuthorID: 57192372795; ResearcherID: AAD-9374-2019; ORCID: 0000-0001-7409-0844; e-mail: wastingtimefilmart@gmail.com

Authors' contributions: *the authors made an equivalent contribution to the preparation of the publication.*
The authors declare no conflict of interest.

ПОЖАРОВЗРЫВОБЕЗОПАСНОСТЬ/FIRE AND EXPLOSION SAFETY. 2024. Т. 33. № 5. С. 87–98
POZHAROVZRYVOBEZOPASNOST/FIRE AND EXPLOSION SAFETY. 2024; 33(5):87-98

НАУЧНАЯ СТАТЬЯ/RESEARCH PAPER

УДК 681.5:658.5

https://doi.org/10.22227/0869-7493.2024.33.05.87-98

Модель прогнозирования класса готовности датчиков термохимического газосигнализатора для предотвращения пожаров и взрывов

Илья Вадимович Самарин ✉, Андрей Юрьевич Строгонов, Алексей Вячеславович Крючков

Российский государственный университет нефти и газа (национальный исследовательский университет) имени И.М. Губкина, г. Москва, Россия

АННОТАЦИЯ

Введение. Актуальность рассматриваемой в статье проблемы заключается в необходимости совершенствования автоматизации и интеллектуализации организационного управления пожаровзрывобезопасностью на объектах топливно-энергетического комплекса. Дрейф нуля из-за влияния ряда параметров у термохимических датчиков снижает их чувствительность, что требует разработки новых подходов в реализации их технического обслуживания (ТО). Модель прогнозирования класса готовности датчиков, основанная на сверточной нейронной сети (СНС), позволяет скорректировать установленный процесс принятия решений о ТО, предотвращая опасные ситуации на ранних этапах развития.
Задача исследования. Повышение эффективности работы лиц, принимающих решения (ЛПР) при планировании работ бригад, выполняющих диагностику и техническое обслуживание вспомогательного оборудования, используемого в том числе для обеспечения пожарной безопасности (ПБ).
Методы. Для расчета значений классификации при прогнозировании класса готовности датчиков газосигнализаторов использовался метод стратегического планирования, основанный на важности признаков (динамического стратегического планирования с использованием математического программирования). В соответствии с ним класс готовности определялся как сумма бинарных значений признаков, умноженных на нормированное значение их важности.
Результаты и их обсуждение. Для проведения расчетов и оценки результатов применения СНС авторами была разработана программа на языке программирования Python. С ее помощью был сгенерирован общий набор данных, из которого в соотношении 9:1 были выбраны обучающий и тестовый наборы. После их формирования СНС прошла обучение. Тестирование показало, что ЛПР может прогнозировать класс готовности датчиков газосигнализаторов с вероятностью 89 %.
Выводы. Представленная в статье СНС позволяет повысить эффективность работы ЛПР при планировании работ бригад, выполняющих диагностику и техническое обслуживание вспомогательного оборудования для ПБ. Принцип работы данной СНС может быть использован для решения других аналогичных задач планирования и управления.

Ключевые слова: сверточная нейронная сеть; пожарная безопасность; техническое обслуживание; предупреждение пожаров и взрывов; прогнозирование готовности; метод стратегического планирования

Для цитирования: *Самарин И.В., Строгонов А.Ю., Крючков А.В.* Модель прогнозирования класса готовности датчиков термохимического газосигнализатора для предотвращения пожаров и взрывов // Пожаровзрывобезопасность/Fire and Explosion Safety. 2024. Т. 33. № 5. С. 87–98. DOI: 10.22227/0869-7493.2024.33.05.87-98

✉ *Самарин Илья Вадимович,* e-mail: ivs@gubkin.ru

Model of predicting the readiness class of thermochemical gas alarm sensors for fire and explosion prevention

Ilya V. Samarin ✉, Andrey Yu. Strogonov, Aleksey V. Kryuchkov

National University of Oil and Gas “Gubkin University”, Moscow, Russian Federation

ABSTRACT

Introduction. The relevance of the problem considered in the paper is in the need to improve the automation and intellectualization of organizational management of fire and explosion safety at the facilities of the fuel and energy complex. Zero drift due to the influence of a number of parameters in thermochemical sensors reduces

© И.В. Самарин, А.Ю. Строгонов, А.В. Крючков, 2024

their sensitivity, which requires the development of new approaches in the implementation of their maintenance. The sensor readiness class prediction model, based on a convolutional neural network (CNN), allows to adjust the established decision-making process, preventing dangerous situations at early stages of development.
Objective. To increase the efficiency of decision makers (DM) in planning the work of teams performing diagnostics and maintenance of auxiliary equipment used, among other things, to ensure fire safety (FS).
Methods. To calculate the classification values when predicting the readiness class of gas alarm sensors, a strategic planning method based on the importance of features (dynamic strategic planning using mathematical programming) was used. According to it, the readiness class was defined as the sum of the binary values of the features multiplied by the normalized value of their importance.
Results and discussion. To carry out calculations and evaluate the results of the CNN application, the authors developed a programme in the Python programming language. It was used to generate a common data set from which training and test sets were selected in a ratio of 9:1. After their formation, the CNN was trained. Testing showed that the DM can predict the readiness class of gas alarm sensors with a probability of 89 %.
Conclusions. The CNN presented in the paper allows to increase the efficiency of the DM work when planning the work of teams performing diagnostics and technical maintenance of auxiliary equipment for FS. The principle of operation of this CNN can be used to solve other similar planning and management tasks.

Keywords: convolutional neural network; fire safety; maintenance; fire and explosion prevention; forecasting readiness; strategic planning method

For citation: Samarin I.V., Strogonov A.Yu., Kryuchkov A.V. Model of predicting the readiness class of thermochemical gas alarm sensors for fire and explosion prevention. *Pozharovzryvobezopasnost/Fire and Explosion Safety*. 2024; 33(5):87-98. DOI: 10.22227/0869-7493.2024.33.05.87-98 (rus).

✉ *Ilya Vadimovich Samarin*, e-mail: ivs@gubkin.ru

Введение

Новые подходы к развитию отраслей промышленности требуют внедрения самых современных технологий, которые стремительно меняют характер работ, в том числе, на предприятиях топливно-энергетического комплекса (ТЭК). Использование таких подходов всегда связано с применением новых поколений информационных технологий (ИТ). Одним из таких поколений являются системы искусственного интеллекта (ИИ), реализуемые с помощью программного обеспечения (ПО), включаемого в автоматизированные системы управления (АСУ) предприятиями (АСУП) и технологическими процессами (АСУТП).

Развитие ИТ, связанных с ИИ, опирается на накопленные в электронном виде знания, которые, как правило, чаще всего администрируют правительства государств, владея и храня «от имени своего народа огромные объемы данных» [1]. Владение данными предусматривает разработку порядка их использования субъектами экономической деятельности. Для этого в РФ была разработана Национальная стратегия развития ИИ на период до 2030 года[1]. В соответствии с ней одной из приоритетных задач является «разработка и развитие программного обеспечения, в котором используются системы искусственного интеллекта» (п. 24, б). Таким ПО, как правило, являются нейронные сети. Учитывая специфичность решаемых ими конкретных задач, их следует отнести к специальному ПО (СПО) в АСУТП.

[1] Национальная стратегия развития ИИ на период до 2030 года утверждена Указом Президента РФ от 10.10.2019 № 490. URL: http://static.government.ru/media/acts/files/1201910110003.pdf (05.07.2024).

Применение технологий ИИ меняет саму суть науки об управлении. Появляются новые противоречия, возникающие, в том числе, и в производственной сфере и приводящие к напряжению внутри процессов управления на объектах ТЭК. Примером точки напряжения в управлении может служить «противоречие между огромными потоками данных, накапливаемых в производственных процессах, в частности — в системах промышленной автоматизации и контроля в виде данных объективной измерительной информации, поступающей с датчиков и различных средств измерений технологического оборудования» и «необходимостью их оперативного анализа с целью извлечения полезной информации и принятия оперативных управляющих решений» [2]. Оперативным анализом и принятием решений на производствах и внутри любых социальных систем занимаются лица, принимающие решения (ЛПР).

Возникающее из-за большого объема данных противоречие затрудняет для ЛПР обеспечение пожарной безопасности (ПБ) объектов ТЭК. Несмотря на то что разработанные в недавнем времени принципы автоматизации работы в области ПБ, сконцентрированные в автоматизированных системах пожаровзрывобезопасности (АСПВБ), позволили разработать немало приложений для поддержки управления [3, 4], проблема обеспечения качественного технического обслуживания оборудования в составе таких систем информирования АСУТП первого уровня, как автоматизированные системы предотвращения пожаров и взрывов, остается по-прежнему актуальной [5].

«Цифровые двойники» (Digital Twins — DT) объектов ТЭК, изначально представлявшие собой СПО «управления жизненным циклом продукта, именуемого PLM-системами (англ. Product lifecycle

management)» [6], были предназначены в том числе для облегчения принятия ЛПР необходимых оперативных управленческих решений в АСУТП и ее составной части — АСПВБ. DT стали применяться внутри ПО АСПВБ в том числе для анализа устойчивости АСПВБ с использованием методов моделирования величины энтропии АСПВБ [7]. Однако увеличение точек контроля и объемов данных, анализ которых следовало бы проводить ЛПР за все меньшее время, вынудило к применению систем ИИ уже внутри DT. И как показала практика применения таких систем, «сокращаются потери времени на подготовительные, заключительные работы, перерывы и форс-мажорные ситуации, связанные с человеческим фактором» [8].

Примером подобных подготовительных работ и форс-мажорных ситуаций являются датчики газоанализаторов, относящиеся к подсистеме АСВПБ по предотвращению пожаров и взрывов. Для них необходимо регулярное (не менее 4–8 раз в год в зависимости от типа) техническое обслуживание (ТО) с использованием поверочной газовой смеси (ПГС), предназначенное для предотвращения дрейфа нуля. Но если для механических систем данный вопрос давно и основательно прорабатывался (например, [9]), то для систем, связанных с химическими или иными чувствительными элементами, он пока недостаточно хорошо изучен. Например, о данной проблеме пишут [10] в контексте использования подобных датчиков на производственных предприятиях угольной промышленности. Однако звучит только лишь формулировка проблемы, а для ее решения предлагается рассматривать датчики другого типа.

Учитывая разнообразие применяемых в настоящее время приборов оценки состояния среды на объектах ТЭК при построении нейронной сети для определения порядка их ТО, следует выбрать одну из применяемых марок. Очевидно, выбор следует проводить исходя из стоимости, определяющей распространенность датчика. Анализ применения показал, что термохимические датчики (ТХД) имеют низкую стоимость и потому наиболее распространены. Еще одним важным обстоятельством в их пользу (для рассмотрения в качестве основы для исследования) является их способность контролировать одновременно несколько десятков различных горючих составов, в большинстве своем свыше 20.

Для ТХД дрейф нуля обусловлен внутренними процессами в катализаторе, которые происходят не только после его установки на объект, но даже и при его хранении. Снижение их чувствительности может достигать значительных величин. Так, по оценкам экспертов ЗАО «Промкатализ», хранение ТХД на складах в течение года может привести к отклонениям от нормативных показателей до 10 %, что соответствует степени разрушения катализатора до 0,83 % в месяц. Помимо этого, дрейф нулевых показаний также может быть вызван сильным ветром, туманом, дождем, морозом, выбросом каталитически активных веществ и другими факторами, о чем прямо говорит рабочая документация ТХД.

Тем не менее ЛПР для обеспечения на объектах ТЭК ПБ необходима максимально точная информация. Ее получение обеспечивает своевременное проведение ТО на всех без исключения приборах, входящих в систему информирования АСУТП первого уровня и фиксирующих положение дел в реальном масштабе времени. Для подсистем АСПВБ по предотвращению пожаров и взрывов это — фиксирование опасных ситуаций, которые могут привести к пожару, с помощью анализа химического состава окружающей среды в зоне установки датчика ТХД для его предупреждения на наиболее ранней стадии.

Внедрение систем ИИ на базе нейронных сетей, включенных в DT и в АСПВБ, обеспечивает ЛПР оперативный анализ и выдачу данных о необходимости проведения ТО по устранению дрейфа нуля на конкретных приборах с учетом протекающих на объекте ТЭК технологических процессов.

Статья посвящена созданию на основе данных об одном из ТХД нейронной сети и ее обучению с целью добиться наиболее точного анализа состояния установленных на объектах ТЭК приборов информирования АСУТП первого уровня.

Задача исследования

Несмотря на то что в более общем контексте описанное выше противоречие [2] привело на глобальном уровне к «снижению ожиданий»[2] от внедрения систем, использующих технологии ИИ, их включение в СПО АСПВБ дает свой положительный результат.

Для отслеживания базовой линии процесса ТО газосигнализаторов, устанавливаемых на объектах ТЭК, имеют важное значение их количество и пространственное расположение. В этом смысле характер ТО может определяться как состоянием датчиков, так и регламентным временем их ТО, определяемым эксплуатационной документацией. Помимо этого, важен также состав бригад: располагаемое ЛПР количество людей по отношению к общему количеству датчиков.

Если не выделять модель и марку датчиков, устанавливаемых на объекте ТЭК, то в общем виде задача исследования может быть сформулирована в качестве неравенства, определяющего то, как бригада

[2] 4 тренда, которые преобладают в цикле Gartner Hype for AI, 2021 г. URL: https://www.gartner.com/en/articles/the-4-trends-that-prevail-on-the-gartner-hype-cycle-for-ai-2021 (дата обращения: 05.07.2024).

ТО вводит установленные на объекте датчики в эксплуатацию. Покажем это с помощью формул.

Пусть на объекте ТЭК есть $N_{\text{тип}}$ типов датчиков. Для каждого из типов необходим свой комплекс мероприятий, определяемый его руководством по эксплуатации. Обозначив через $t_{\text{мерД}}^{\text{общ}(j)}$ регламентное время проведения мероприятий по ТО одного датчика j-го типа, включающего в себя комплекс более мелких мероприятий в количестве $N_{\text{мерД}}j$, представим его вектором:

$$t_{\text{мерД}}^{\text{общ}(j)} = \left\{ t_{\text{мерД}}^{(1j)},\ t_{\text{мерД}}^{(2j)}, \ldots, t_{\text{мерД}}^{(N_{\text{мерД}}j)} \right\}, \quad (1)$$

для одного датчика имеем:

$$t_{\text{мерД}}^{\text{общ}(j)} = \sum_{i=1}^{N_{\text{мерД}}j} t_{\text{мерД}}^{(ij)}, \quad (2)$$

где $t_{\text{мерД}}^{\text{общ}(j)}$ — время проведения i-й составной части мероприятий ТО.

Тогда для всех датчиков j-го типа объекта ТЭК имеем:

$$t_{\text{мерД ОТЭК}}^{\text{общ}(j)} = \sum_{i=1}^{N_{Дj}} t_{\text{мерД}}^{(ij)\text{общ}}, \quad (3)$$

где $N_Дj$ — общее количество датчиков j-го типа на объекте ТЭК;

$t_{\text{мерД}}^{(ij)\text{общ}}$ — общее время проведения мероприятий ТО для i-й датчика j-го типа.

Время проведения мероприятий ТО объекта ТЭК для датчиков всех типов:

$$t_{\text{мер ОТЭК}}^{\text{общ}} = \sum_{j=1}^{N_{\text{тип}}} t_{\text{мерД ОТЭК}}^{\text{общ}(j)}. \quad (4)$$

При этом вектор времен проведения ТО по типам датчиков:

$$t_{\text{мерД}}^{\text{общ}} = \left\{ t_{\text{мерД ОТЭК}}^{\text{общ}(1)}, t_{\text{мерД ОТЭК}}^{\text{общ}(2)}, \ldots, t_{\text{мерД ОТЭК}}^{\text{общ}(N_{\text{тип}})} \right\}. \quad (5)$$

При наличии в бригаде по проведению ТО $N_{\text{Бр}}$ человек, и учитывая, что для проведения мероприятий ТО датчиков с использованием ПГС необходимы как минимум 2 человека, имеем время завершения полного ТО $t_{\text{мер}}^{\text{общ}}$ объекта:

$$t_{\text{мер}}^{\text{общ}} = \frac{2t_{\text{мерДОТЭК}}^{\text{общ}}}{N_{\text{Бр}}}. \quad (6)$$

Для того чтобы ЛПР был уверен в том, что система информирования первого уровня АСУТП в подсистеме АСПВБ по предотвращению пожаров и взрывов была готова к работе, необходимо, чтобы бригада ТО успела устранить последствия дрейфа нуля для всех групп датчиков. Фактически это решение задачи линейного программирования:

$$t_{\text{мер}}^{\text{общ}} \le \min_j t_{\text{мерД}}^{\text{общ}}. \quad (7)$$

Формула (7) может позволить ЛПР определить дисциплину ТО на объекте ТЭК: порядок обхода бригадой ТО установленных датчиков для проведения мероприятий ТО в том числе с использованием ПГС. Но, учитывая, что помимо регламентного значения времени ТО, использованного в формуле (7), ему требуется фиксирование событий непогоды, выбросов вредных веществ и иных влияющих на состояние датчиков факторов, дисциплина ТО будет постоянно меняться. Допуская, что состояния датчиков будут различны (каждый из них при проведении ТО с ПГС «теряет» часть катализатора), и учитывая перечисленные возможные опасные для датчиков события, в отличие от (7) получаем более сложную задачу.

Внедрение DT, которые также называют Индустрией 4.0, значительно увеличивает как число датчиков, так и суммарный поток информации от них. В современных условиях ввиду потребности одновременного решения ЛПР многих сложных задач управления (включающих анализ и принятие решений), ЛПР зачастую сложно оперативно, своевременно и корректно менять дисциплину ТО. Поэтому внутри указанной подсистемы АСПВБ необходима разработка средства поддержки управления, позволяющего анализировать классы готовности датчиков, оказывая ему обоснованную помощь. Вариантом такого средства может быть нейронная сеть, как СПО АСПВБ, накапливающая обучающую информацию для анализа и выдачи рекомендаций по решениям. Изначально в ней может быть реализован только один из типов датчиков. Проведенный выше анализ показал, что выбор ТХД обоснован и может дать нужный результат. Модель датчика для создания такого СПО внутри данного класса приборов не так важна. Дальнейшее развитие сети будет зависеть от добавления в исходный набор новых признаков для данного и других датчиков.

Ввиду достаточной распространенности СТМ-10, широко применяемого на многих нефтеперерабатывающих предприятиях РФ, уместно сделать его отправной точкой формирования набора данных для обучения системы ИИ. Все типы и марки ТХД, включая и СТМ-10, работают по принципу определения энергии окисляемого ими газа с помощью катализатора. Выделяемая энергия внутри датчика Q может быть рассчитана по формуле:

$$C_x H_y + \left(x + \frac{y}{2} \right) O_2 = xCO_2 + \frac{y}{2} H_2O + Q, \quad (8)$$

где x и y — количество атомов углерода и водорода в химическом соединении окисляемого углеводорода.

В зависимости от величины Q прогнозируется или определяется нижний концентрационный предел распространения пламени (НКПР), обычно выражаемый в процентах. НКПР — минимальное содержание горючего вещества в однородной смеси с окислительной средой, при котором возможно распространение пламени по смеси на любое расстояние от источника зажигания[3]. Его используют в качестве предельных значений порогов предупреждения и срабатывания систем пожаротушения. От того, насколько точно датчики в подсистеме АСПВБ по предотвращению пожаров и взрывов (приборы информирования АСУТП первого уровня) отслеживают значение данного показателя, зависит успешность обеспечения ПБ на объектах ТЭК.

Методы решения

Для решения задач поддержки управления при разработке и построении системы ИИ в СПО АСПВБ, а также ее обучения, следует выбрать тип нейронной сети. Как было сказано выше, задача прогнозирования состояния датчиков требует от строящейся нейронной сети и ЛПР применения «методов анализа данных, концентрирующихся на прогнозировании будущего поведения … с целью принятия оптимальных решений» [11].

Бригады ТО обеспечивают надежность показаний датчиков, проводя их поверку и калибровку. Для динамического формирования маршрутов специалистов в соответствии с описанными выше изменениями, влияющими на дрейф нуля в ТХД, ЛПР нужна оперативная информация о текущем состоянии каждого из них. Отдельные датчики могут быть повреждены, отдельные заменены, у некоторых из них возможен отказ в функционировании. В переводе на язык систем ИИ состояние датчика будет соответствовать определенному классу, выбором которого она должна будет заниматься. Решения об изменении дисциплины ТО будут приниматься ЛПР с учетом класса состояния каждого из датчиков. Такой вид решаемых сетью задач называется задачами классификации, суть которых заключается в предсказании категории изучаемых объектов или их разделении по заранее заданным признакам. Перечисленные выше факторы, обуславливающие дрейф нуля, в данном случае становятся параметрами, совокупность которых будет определять класс ТХД в нейронной сети. Их уточнение будет проведено ниже.

Методы решения задач классификации в нейронных сетях связаны с моделями глубокого обучения. Они основаны «на нескольких уровнях представления данных» и способны «отображать сложные отношения между входящими и исходящими данными … путем их преобразования или извлечения из них функций» [12]. Глубина сети зависит от количества входных и выходных слоев. Она создает распределенное представление об объекте анализа: каждый ее уровень состоит сразу из многих точек анализа [13–17]. Алгоритмы глубокого обучения хорошо справляются с изменениями, порождаемыми, например, с классификацией точек на местности, связанными с определением мест возгораний [16]. Краткая характеристика ряда аспектов глубокого обучения приведена в [17].

При выборе типа нейронной сети важно сократить количество используемых для ее обучения признаков, не потеряв при этом в качестве классификации. Такую эффективность в совокупности с высокой скоростью обучения дают сверточные нейронные сети (СНС). Кроме этого, при их использовании повышается точность решения задач прогнозирования за счет создания паттернов мониторинга путем комбинирования сверточных слоев [18]. Благодаря операциям свертки применяемые в сверточных слоях фильтры могут извлекать локальные паттерны необработанных данных, уточняющие состояние оборудования. Результаты применения отдельных СНС [18] показывают их преимущества перед традиционными методами машинного обучения (случайный лес, метод опорных векторов и многослойный персептрон). Поэтому уместно использовать именно этот тип нейронных сетей для разработки стратегий по изменениям в дисциплине ТО.

Приняв за точку отсчета в обучении СНС газосигнализатор типа СТМ-10, выберем необходимые данные для прогнозирования его состояния. Руководство по эксплуатации данного прибора подробно описывает как сами аспекты его правильной установки и эксплуатации, так и факторы, влияющие на его корректную работу[4]. Учитывая, что для проработки всех особенностей его корректной работы при установке на объекте ТЭК понадобится фиксация значений нескольких сотен признаков, выберем сначала для разработки и испытания СНС небольшое их количество. Эти признаки приведены в табл. 1.

Минимальные и максимальные значения признаков (см. табл. 1) определяются согласно руководству по эксплуатации СТМ-10 и установленным стандар-

[3] ГОСТ 12.1.044–89. Система стандартов безопасности труда. Пожаровзрывоопасность веществ и материалов. Номенклатура показателей и методы их определения. М. : Стандартинформ, 2006, 216 с. (п. 2.5.1.).

[4] Сигнализаторы СТМ-10. Руководство по эксплуатации. Альбом приложений. АПИ2 840.069 РЭ1. URL: http://www.analitpribor-smolensk.ru/products/bezopasnost_gazoanalizatory/stacionarnye_gazoanalizatory/signalizator_stm10/ (дата обращения: 10.07.2024).

тами безопасности ПДК[5]. Ряд максимальных значений намеренно завышен для формирования у СНС представления о более высоких классах состояний ТХД.

Состав набора данных для обучения СНС должен содержать не только значения признаков, но также и значение класса готовности, который определит действия ЛПР по изменению дисциплины ТО. Поэтому строки в обучающем и тестовом наборах имеют следующую структуру:

$$X_j = \left\{ x_{j1}, x_{j2}, \ldots, x_{jN_{\text{пр}}}, y_j \right\}, \quad (9)$$

где j — номер строки обучающего и тестового наборов;

$x_{j1}, x_{j2}, \ldots, x_{jN_{\text{пр}}}$ — значения признаков (в нашем случае из табл. 1);

$N_{\text{пр}}$ — число признаков в строке обучающего и тестового наборов (в нашем случае 10);

y_i — значение класса состояния ТХД.

Общая структура набора данных для обучения СНС представлена также на рисунке. Она содержит те же элементы, что и вектор (9).

Для определения значений готовности ТХД (y_j, см. (9)) следует считать, что отдельные признаки взаимно независимы. Тогда, используя математическую модель, аналогичную изложенной в [19], будем считать значение класса готовности целевой функцией, основанной на значениях двоичных функций признаков $f(x_{ji})$. Для каждой из них запишем:

$$f\left(x_{ji}\right) = \begin{cases} 0, \left\{ x_{ji} \geq x_{ji}^{(\min)} \middle| x_{ji} \leq x_{ji}^{(\max)} \right\}; \\ 1, \left\{ x_{ji} \leq x_{ji}^{(\min)} \middle| x_{ji} \geq x_{ji}^{(\max)} \right\}, \end{cases} \quad (10)$$

где x_{ij} — значение i-го признака из вектора (9) в j-й строке;

$x_{ji}^{(\min)}$ и $x_{ji}^{(\max)}$ — минимальное и максимальное значение i-го признака (см. табл. 1) для j-й строки.

Каждый из признаков x_{ji} имеет для ЛПР определенную важность:

$$\alpha = \left\{ \alpha_1, \alpha_2, \ldots, \alpha_{N_{\text{пр}}} \right\}. \quad (11)$$

Для корректного расчета значений y_j следует считать важность нормированной величиной:

$$\sum_{i=1}^{N_{\text{пр}}} \alpha_i = 1. \quad (12)$$

В общем случае она может изменяться, так как задачи, стоящие перед ЛПР, могут заставить его менять приоритеты:

$$\alpha(t) = \left\{ \alpha_1(t), \alpha_2(t), \ldots, \alpha_{N_{\text{пр}}}(t) \right\}. \quad (13)$$

[5] ГОСТ 12.1.005–88. Система стандартов безопасности труда. Общие санитарно-гигиенические требования к воздуху рабочей зоны. URL: https://internet-law.ru/gosts/gost/1583

Таблица 1. Признаки для обучения модели СНС
Table 1. Signs for training a CNN model

Название, ед. изм. Name, unit of measurement	Значение Meaning	
	min	max
Диапазон атм. давления, мм рт. ст. Atmospheric pressure range, mmHg	630	800
Диапазон влажности воздуха, % Air humidity range, %	30	98
Напряженность внешнего электрического поля, кВ/м The intensity of the external electric field, kV/m	5,5	10,0
Напряженность внешнего магнитного поля, А/м The strength of the external magnetic field, A/m	220	400
Содержание пыли в воздухе, мг/куб. м Dust content in the air, mg/cubic metre	3,5	10,0
Вибрации с частотой 25 Гц, амплитуда, мм Vibrations with a frequency of 25 Hz, amplitude, mm	0,05	0,12
Содержание вредных веществ. Сера, мг/м^3 The content of harmful substances. Sulfur, mg/m^3	0,01	6,60
Содержание вредных веществ. Мышьяк, мг/м^3 The content of harmful substances. Arsenic, mg/m^3	0,01	0,05
Содержание вредных веществ. Пыль сурьмы, мг/м^3 The content of harmful substances. Antimony dust, mg/m^3	0,01	0,24
Содержание вредных веществ. Сероводород, мг/м^3 The content of harmful substances. Hydrogen sulfide, mg/m^3	0,01	10,2

Придерживаясь изложенной в [19] математической модели, запишем аддитивную целевую функцию для значений класса состояния ТХД:

$$y_j = \sum_{i=1}^{N_{\text{пр}}} \alpha_i(t) f\left(x_{ji}\right). \quad (14)$$

Другим вариантом расчета y_j может быть модель, изложенная в [20].

Для упрощения расчетов значения y_j в строках обучающего и тестового набора СНС следует сделать нормированными или дискретными. В послед-

x_1	x_2	x_3	x_4	x_5	x_6	x_7	x_8	x_9	x_{10}	...	x_k	y
742	39	5	265	7	8	0,01	0	15	0	…	…	8
…	…	…	…	…	…	…	…	…	…	…	…	…

Вид набора данных для СНС
Type of dataset for the CNN

нем случае значения класса готовности ТХД будут частью множества *Y:*

$$Y : y_j \in \{1,\ 2,\ \ldots\ N_{\text{пр}}\}\,. \qquad (15)$$

В нашем случае y_j будет принимать значения от 0 до 9. Значение 0 — полная готовность. Для остальных значений класса готовности ТХД ниже приведены характеристики, описывающие рекомендуемые действия ЛПР:

(0–3) — наблюдение;
(4–7) — корректировка плана несрочная;
(8–9) — срочная корректировка плана.

Результаты и обсуждение

Для построения СНС первым шагом был сгенерирован массив исходных данных, включающий набор из случайных значений признаков (см. табл. 1). С этой целью на языке программирования Python была написана программа генерации синтетического набора данных для решения с помощью сверточной нейронной сети задачи классификации состояний выносных датчиков газосигнализаторов на объектах ТЭК по данным газосигнализаторов СТМ-10. Программа может генерировать набор данных, работая по следующему алгоритму.

Значения каждого из 10 предложенных признаков записывались в отдельный массив, формируемый из случайных значений, находящихся между $x_{ji}^{(\min)}$ и $x_{ji}^{(\max)}$. Затем из полученных 10 массивов объемом 1000 элементов каждый случайным образом одновременно выбирались значения признаков x_{ji}. Полученные 10 значений заносятся в отдельный массив, прототип строки входного набора, для которого по формуле (14) рассчитывается значение класса готовности. Изначально в целях отработки правильности работы программы важность каждого из признаков была зафиксирована равной 1. Полученное в результате значение класса состояния выносного датчика записывается в массив со значениями признаков. Объем сгенерированного таким образом входного набора составил свыше 59 000 записей, что соответствует общепринятым рекомендациям к объемам набора данных для обеспечения более высокой точности модели при ее обучении. Количество записей определяет диапазон изменения индекса *j* (см. формулы (9)–(15)). Пример полученного входного набора показан в табл. 2.

После получения массива исходных данных на языке программирования (ЯП) Python с использованием предназначенных для задач машинного обучения библиотек TensorFlow, Keras и Scikit-learn была реализована программа построения модели СНС. Для нее входной набор был разделен на обучающий и тестовый в соотношении 4:1 (80 % на обучение и 20 % на тест). Для оценки производительности модели была выбрана метрика accuracy (измеряет процент правильно классифицированных образцов, качество модели). Перед работой СНС в обучающем наборе были проведены проверка на пустые значения и масштабирование признаков.

При разбиении данных использовали параметр random_state с целью контроля рандомизации и для гарантии, что каждый раз будем получать одно и то же разделение на тренировочную и тестовую выборки, что важно при наблюдении динамики изменения значения параметра по оценке качества модели в СНС при каждой новой генерации.

Для решения задачи классификации с использованием СНС на данных, которые не являются изображениями, используются одномерные сверточные слои. В Python они реализованы через оператор одномерных сверточных фильтров Conv1D. С его помощью происходит извлечение из последовательности значений признаков и их свертка.

На начальной стадии создания СНС, учитывая, что сгенерированный входной набор был получен программно, а не из журналов регистрации объектов ТЭК, можно допустить, что она будет содержать не большое количество слоев. Моделирование допускает внутри СНС два сверточных слоя: слой подвыборки и плотный (полносвязный) слой. Результаты моделирования в СНС будут находиться в выходном слое. В дальнейшем, по мере увеличения количества реальных данных во входном наборе, число слоев в ней можно будет увеличить.

Для создания СНС с двумя сверточными слоями будем использовать следующую последовательность действий:

1. Добавляем последовательно первый и второй сверточный слой. Для каждого из них используем 64 фильтра, ядро размером 3 и функцию активации ReLU, которая используется для глубоких нейронных сетей.

2. Для обработки одномерных данных добавляем слой подвыборки (слой пулинга) с размером

Таблица 2. Пример входного набора СНС
Table 2. An example of an input set for CNN

Давление Pressure	Влажность Humidity	Электрическое поле Electric field	Магнитное поле Magnetic Field	Пыль Dust	Сера Sulfur	Мышьяк Arsenic	Сурьма Antimony	Сероводород Hydrogen Sulfide	Вибрация Vibration	Класс готовности Readiness class
631	46	0,1279	76,939	7,938	6,410	0,036	0,082	1,321	0,724	4
672	48	10,746	376,566	5,123	3,342	0,029	0,127	6,168	0,915	2
685	49	3,429	277,475	7,041	1,715	0,011	0,212	0,879	0,069	1
633	52	7,546	77,886	8,630	4,202	0,003	0,138	10,492	0,265	3
671	86	6,691	115,738	4,346	0,149	0,036	0,153	2,951	0,466	2
737	42	3,412	221,173	11,782	2,898	0,048	0,143	3,952	0,009	1
661	54	8,802	336,984	10,734	4,265	0,039	0,144	8,214	0,376	2
631	89	10,636	298,427	10,061	3,326	0,026	0,018	8,105	0,151	3
780	44	5,291	192,099	1,049	0,636	0,017	0,025	4,466	0,007	3
762	50	5,228	290,546	3,721	3,194	0,031	0,005	11,666	0,111	1
776	30	8,529	5,35488	0,339	0,149	0,029	0,109	4,298	0,056	2
719	61	11,793	302,342	7,615	7,119	0,025	0,101	5,965	0,063	2
704	98	1,443	214,605	11,398	2,859	0,039	0,131	8,068	0,079	3

окна пулинга 2. Пулинг — один из типов техники скользящего окна, где используется статистическая функция некоторого типа для сокращения объема данных. Скользящее окно (условный квадрат или вектор из данных), называемое фильтром, является входом некоторой функции, значение которой затем используется сетью в качестве нового входного параметра. Если размер входа (n, n) или (n), то на следующем этапе сеть заменит его на 1 значение функции-фильтра. В данном случае (n) будет размером окна пулинга. Будем использовать функцию $\max_2(x_{j1}, x_{j2})$ для так называемого максимального пулинга. Это означает, что функция в слое будет выбирать максимальное значение из каждых 2 соседних элементов в последовательности, например (x_{j1}, x_{j2}).

3. Преобразуем с помощью оператора сглаживания слоя Flatten() полученные на предыдущем шаге выходы сверточных слоев в одномерный вектор.

4. Добавляем полносвязный слой со 100 нейронами и функцией активации ReLU для нелинейного преобразования признаков после пулинга.

5. При обучении СНС с большим количеством параметров она может слишком точно запоминать данные обучающего набора. Тогда на новых, ранее не вводимых данных, она будет делать неправильные выводы. Для предотвращения спонтанного и незапланированного переобучения модели СНС (регуляризации) добавляем так называемый слой выпадания с помощью оператора языка Python Dropout(). Здесь же устанавливаем вероятность исключения нейронов 0,5.

6. Добавляем выходной слой с 9 нейронами и функцией активации softmax для многоклассовой классификации.

Созданная таким образом СНС на ЯП Python должна пройти компиляцию и апробацию. Для этого сначала компилируем ее со следующими значениями параметров:

- optimizer='adam' — тип оптимизатора (выбран градиентный оптимизатор из модуля Keras ЯП Python); используется во многих СНС для обновления весов при преобразовании значений признаков в модели во время обучения;
- loss='categorical_crossentropy' — функция потерь для задач многоклассовой классификации с категориальным выходом; нам необходимо иметь при обучении более чем два класса состояния датчиков;
- metrics=['accuracy'] — оператор задает различные метрики при работе СНС, позволяющие отслеживать процесс ее обучения; выбираем одну метрику «accuracy» для отслеживания точности во время обучения.

После компиляции проводим апробацию, представляющую собой сам процесс обучения СНС на обучающем наборе (80 % строк от входного). Для этого, помимо перечисленных, выше задаем дополнительное условие, которое заключается в следующем.

Процесс обучения модели должен быть остановлен до обработки всех строк обучающего набора в случае, если интерпретатор ЯП Python, в котором будет выполняться модель, зафиксирует, что модель

Таблица 3. Результаты обучения модели СНС
Table 3. Learning results of the CNN model

Эпоха Epoch of training	Время обучения, с Training time, seconds	Accuracy (качество, точность модели quality, accuracy of the model)	Loss (значение функции потерь the value of the loss function)	Val_accuracy (качество, точность модели на валидационной выборке the quality and accuracy of the model based on the validation selection)	Val_loss (значение функции потерь на валидационной выборке the value of the loss function in the validation selection)
1	17	0,3766	1,4694	0,5502	1,0279
2	11	0,5507	1,0123	0,6320	0,8544
3	11	0,6137	0,8941	0,6561	0,8023
4	11	06417	0,8291	0,6939	0,7238
5	11	0,6649	0,7729	0,6977	0,7116
6	11	0,6825	0,7449	0,7251	0,6501
…	…	…	…	…	…
93	11	0,8781	0,3005	0,8918	0,2896
94	11	0,8775	0,3086	0,8929	0,2870
95	11	0,8815	0,2964	0,8782	0,3053
96	11	0,8778	0,3104	0,8961	0,2860
97	11	0,8819	0,2973	0,8858	0,2953
98	11	0,8812	0,2945	0,8907	0,3047
99	11	0,8801	0,3020	0,8864	0,2941
100	11	0,8779	0,3008	0,8888	0,2994
Итого / Total				0,8910	0,2960

начинает «ухудшаться» на валидационной выборке. Подобная остановка обучения предусмотрена для предотвращения переобучения СНС. В связи с этим предусмотрена остановка обучения в случае, если интерпретатор ЯП Python установит, что значение функции потерь на валидационном наборе (val_loss) не будет уменьшаться в течение 10 эпох подряд.

Полученная таким образом СНС обучается в течение 100 эпох (итераций по обучающему набору данных) с использованием оптимизатора adam и параметра categorical_crossentropy функции потерь, учитывая, что нам необходимо иметь на выходе 10 классов готовности ТХД. Для контроля полученных при ее обучении результатов используется тестовый набор (20 % строк от входного), подключаемый интерпретатором ЯП Python для формирования метрик точности обучения в конце каждой эпохи. Динамика результатов обучения модели показана в табл. 3.

Итоговое значение метрики accuracy (качество модели) составило 0,8910 (модель правильно классифицирует 89 % образцов), а значение функции потерь — 0,2960 (средняя ошибка модели на данных). Учитывая случайный характер генерации исходного набора данных и отсутствие шага донастройки параметров модели, полученные результаты позволяют сделать вывод об адекватности функционирования модели и соответствия результатов поставленной в задаче цели.

Выводы

Полученные при моделировании результаты показывают, что даже сгенерированные случайным образом значения признаков СНС позволяют добиться ее адекватности в предсказании состояний датчиков в подсистемах АСПВБ по предотвращению пожаров и взрывов. Это подтверждает тезис о необходимости включения в комплекс средств поддержки управления ЛПР объектов ТЭК систем ИИ, которые в современных условиях помогут ему более оперативно принимать решения об изменениях дисциплины ТО в любых системах информирования первого уровня АСУТП.

Применение полученных результатов математического и программного моделирования является актуальным и дает возможность в дальнейшем проводить такие же исследования для различных других типов исходных данных: типов приборов, объектов классификации, процессов управления с известными ЛПР метриками и т.п.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. *Юсупова Д.М.* Аспекты внедрения искусственного интеллекта в цифровую трансформацию экономики и в системы электронного правительства // Экономика и социум. 2023. № 4 (107)-2. С. 801–815. URL: www.iupr.ru
2. *Шкодырев В.П.* Эволюция в кибернетике: управление, основанное на знаниях // Системный анализ в проектировании и управлении : сб. науч. тр. XXVI Междунар. науч.-практ. конф. В 3-х частях. Санкт-Петербург, 2023. С. 51–58. DOI: 10.18720/SPBPU/2/id23-34
3. *Топольский Н.Г.* Основы автоматизированных систем пожаровзрывобезопасности объектов. М. : МИПБ МВД России, 1997. 164 с.
4. *Абросимов А.А., Топольский Н.Г., Федоров А.В*. Автоматизированные системы пожаровзрывобезопасности нефтеперерабатывающих производств. М. : МИПБ МВД России, 1999. 244 с.
5. *Федоров А.В., Гаплаев А.А.-Б., Топольский Н.Г., Самарин И.В.* Автоматизация контроля и испытаний систем управления противопожарной защитой объектов топливно-энергетического комплекса / ред. А.В. Федоров. М. : РГУ нефти и газа (НИУ) им. И.М. Губкина, Академия ГПС МЧС России, 2019. 183 с.
6. *Быкова В.Н., Ким Е., Гаджиалиев М.Р., Мусиенко В.О., Оруджев А.О., Туровская Е.А.* Применение цифрового двойника в нефтегазовой отрасли // Актуальные проблемы нефти и газа. 2020. Вып. 1 (28). С. 8. DOI: 10.29222/ipng.2078-5712.2020-28.art8
7. *Бутузов С.Ю., Пранов Б.М., Прус Ю.В., Семиков В.Л., Яковлев О.В.* Модель оценки устойчивости автоматизированных систем пожаровзрывобезопасности // Пожаровзрывобезопасность/Fire and Explosion Safety. 2017. Т. 26. № 6. С. 14–20. DOI: 10.18322/PVB.2017.26.11.14-20. EDN YMCOHG.
8. *Аблаев Р.Р., Абрамова Л.С., Аблаев А.Р.* Импортозамещение и реструктуризация экспортных потоков в области высокотехнологического производства // Московский экономический журнал. 2023. № 3. С. 216–229. DOI: 10.55186/2413046X_2023_8_3_130
9. *Крылов А.А.* Исследование нестабильности дрейфа нуля МЭМС-гироскопов и способов ее учета при калибровке // Известия Тульского государственного университета. Технические науки. 2020. Вып. 1. С. 64–69.
10. *Abdullah Al-hammadi S.R.A., Liang Y.* A review study on methane gas sensors // North American Academic Research. 2021. Vol. 4. Issue 5. Pp. 303–309. DOI: 10.5281/zenodo.4884736
11. *Губенко А.М.* Подходы к применению технологий искусственного интеллекта для решения задач автоматизированного управления в сложных организационно-технических системах // Техника средств связи. 2023. № 4 (164). С. 66–71. DOI: 10.24412/2782-2141-2023-4-66-71
12. *Харитонова Ю.С., Савина В.С., Паньини Ф.* Предвзятость алгоритмов искусственного интеллекта: вопросы этики и права // Вестник Пермского университета. Юридические науки. 2021. Вып. 53. С. 488–515. DOI: 10.17072/1995-4190-2021-53-488-515. EDN EUKCPY.
13. *Ikram Ben Ahmed1, Wael Ouarda, Chokri Ben Amar, Khouloud Boukadi.* DEES-breast: deep end-to-end system for an early breast cancer classification // Evolving Systems. 2024. Vol. 15. Pp. 1845–1863. DOI: 10.1007/s12530-024-09582-9
14. *Sourour Brahimi, Ibrahimi Soumaya, Chokri Ben Amar*. An object recognition method based on deep BCNN with Reinforced Dense Blocks, Conference : 2023 International Conference on Cyberworlds (CW), October 2023. DOI: 10.1109/CW58918.2023.00044
15. *Rim Fakhfakh, Anis Ben Ammar, Chokri Ben Amar.* Deep Learning-Based Recommendation: Current Issues and Challenges // (IJACSA) International Journal of Advanced Computer Science and Applications. 2017. Vol. 8. No. 12. DOI: 10.14569/IJACSA.2017.081209
16. *Zeineb Daoud, Amal Ben Hamida, Chokri Ben Amar.* Fire object detection and tracking based on deep learning model and Kalman filter // Arabian Journal for Science and Engineering. 2023. No. 49 (6). DOI: 10.1007/s13369-023-08127-7
17. *Velibor Božić.* Machine learning vs deep learning. March 2024. DOI: 10.13140/RG.2.2.16632.21762
18. *Shams Forruque Ahmed, Md. Sakib Bin Alam, Maruf Hassan, Mahtabin Rodela et al*. Deep learning modelling techniques: current progress, applications, advantages, and challenges // Artificial Intelligence Review. 2023. No. 56 (11). Pp. 13521–13617. DOI: 10.1007/s10462-023-10466-8
19. *Топольский Н.Г., Самарин И.В., Строгонов А.Ю.* Методика оценки готовности к работе оборудования АСПВБ первого уровня информирования на объектах ТЭК в особых условиях // Пожаровзрывобезопасность/Fire and Explosion Safety. 2019. Т. 28. № 1. С. 35–46. DOI: 10.18322/PVB.2019.28.01.35-46. EDN QHUJWX.
20. *Топольский Н.Г., Самарин И.В., Строгонов А.Ю.* Модель оценки обеспечения комплексной безопасности в АСУТП с применением диагностики пожарных извещателей для построения автоматизированной системы поддержки управления пожаровзрывобезопасностью // Пожаровзрывобезопасность/Fire and Explosion Safety. 2018. Т. 27. № 11. С. 15–22. DOI: 10.18322/PVB.2018.27.11.15-22

REFERENCES

1. Yusupova D.M. Aspects of the introduction of artificial intelligence into the digital transformation of the economy and into electronic government systems. *Economics and Society*. 2023; 4(107-2):801-815. URL: www.iupr.ru (rus).
2. Shkodyrev V.P. Evolution in cybernetics: knowledge-based management. *System analysis in design and management. Collection of scientific papers of the XXVI International Scientific and Practical Conference. In 3 parts.* Saint Petersburg, 2023; 51-58. DOI: 10.18720/SPBPU/2/id23-34 (rus).
3. Topolsky N.G. *Fundamentals of automated fire and explosion safety systems for facilities.* Moscow, MIPB of the Ministry of Internal Affairs of Russia, 1997; 164. (rus).
4. Abrosimov A.A., Topolsky N.G., Fedorov A.V. *Automated fire and explosion safety systems for oil refineries.* Moscow, MIPB of the Ministry of Internal Affairs of Russia, 1999; 244. (rus).
5. Fedorov A.V., Gaplaev A.A.-B., Topolsky N.G., Samarin I.V. *Automation of control and testing of fire protection control systems for fuel and energy complex facilities* / Ed. by A.V. Fedorov. Moscow, Gubkin Russian State University of Oil and Gas (NRU), Academy of GPS of the Ministry of Emergency Situations of Russia, 2019; 183. (rus).
6. Bykova V.N., Kim E., Gadzhialiev M.R., Musienko V.O., Orujev A.O., Turovskaya E.A. The use of a digital double in the oil and gas industry. *Actual problems of oil and gas.* 2020; 1(28):8. DOI: 10.29222/ipng.2078-5712.2020-28.art8 (rus).
7. Butuzov S.Yu., Pranov B.M., Prus Yu.V., Semikov V.L., Yakovlev O.V. A model for assessing the stability of automated fire and explosion safety systems. *Pozharovzryvobezopasnost/Fire and explosion safety.* 2017; 26(6):14-20. DOI: 10.18322/PVB.2017.26.11.14-20. EDN YMCOHG. (rus).
8. Ablaev R.R., Abramova L.S., Ablaev A.R. Import substitution and restructuring of export flows in the field of high-tech production. *Moscow Economic Journal.* 2023; 3:216-229. DOI: 10.55186/2413046X_2023_8_3_130 (rus).
9. Krylov A.A. Study of the instability of the zero drift of MEMS gyroscopes and ways of accounting for it during calibration. *Proceedings of Tula State University. Technical Sciences.* 2020; 1:64-69. (rus).
10. Abdullah Al-hammadi S.R.A., Liang Y. A Review Study on Methane Gas Sensors. *North American Academic Research*. 2021; 4(5):303-309. DOI: 10.5281/zenodo.4884736
11. Gubenko A.M. Approaches to the use of artificial intelligence technologies for solving automated control problems in complex organizational and technical systems. *Technology of communication tools*. 2023; 4(164):66-71. DOI: 10.24412/2782-2141-2023-4-66-71 (rus).
12. Kharitonova Yu.S., Savina V.S., Pagnini F. Bias of artificial intelligence algorithms: issues of ethics and law. *Bulletin of the Perm University. Legal sciences*. 2021; 53:488-515. DOI: 10.17072/1995-4190-2021-53-488-515. EDN EUKCPY. (rus).
13. Ikram Ben Ahmed1, Wael Ouarda, Chokri Ben Amar, Khouloud Boukadi. DEES-breast: deep end-to-end system for an early breast cancer classification. *Evolving Systems.* 2024; 15:1845-1863. DOI: 10.1007/s12530-024-09582-9
14. Sourour Brahimi, Ibrahimi Soumaya, Chokri Ben Amar. *An object recognition method based on deep BCNN with Reinforced Dense Blocks, Conference : 2023 International Conference on Cyberworlds (CW)*. October 2023. DOI: 10.1109/CW58918.2023.00044
15. Rim Fakhfakh, Anis Ben Ammar, Chokri Ben Amar. Deep Learning-Based Recommendation: Current Issues and Challenges. *(IJACSA) International Journal of Advanced Computer Science and Applications.* 2017; 8(12). DOI: 10.14569/IJACSA.2017.081209
16. Zeineb Daoud, Amal Ben Hamida, Chokri Ben Amar. Fire object detection and tracking based on deep learning model and Kalman filter. *Arabian Journal for Science and Engineering*. 2023; 49(6). DOI: 10.1007/s13369-023-08127-7
17. Velibor Božić. *Machine learning vs deep learning*. March 2024. DOI: 10.13140/RG.2.2.16632.21762
18. Shams Forruque Ahmed, Md. Sakib Bin Alam, Maruf Hassan, Mahtabin Rodela et al. Deep learning modelling techniques: current progress, applications, advantages, and challenges. *Artificial Intelligence Review.* 2023; 56(11):13521-13617. DOI: 10.1007/s10462-023-10466-8
19. Topolsky N.G., Samarin I.V., Strogonov A.Yu. Methodology for assessing the readiness for operation of first-level information security equipment at fuel and energy complex facilities in special conditions. *Pozharovzryvobezopasnost/Fire and explosion safety*. 2019; 28(1):35-46. DOI: 10.18322/PVB.2019.28.01.35-46. EDN QHUJWX. (rus).
20. Topolsky N.G., Samarin I.V., Stroganov A.Yu. A model for assessing integrated safety in automated process control systems using fire detectors diagnostics to build an automated fire and explosion safety management support system. *Pozharovzryvobezopasnost/Fire and explosion safety*. 2018; 27(11):15-22. DOI: 10.18322/PVB.2018.27.11.15-22 (rus).

Поступила 15.07.2024, после доработки 28.07.2024;
принята к публикации 01.08.2024
Received July 15, 2024; Received in revised form July 28, 2024;
Accepted August 1, 2024

Информация об авторах

САМАРИН Илья Вадимович, д.т.н., доцент, заведующий кафедрой автоматизации технологических процессов, Российский государственный университет нефти и газа (национальный исследовательский университет) имени И.М. Губкина, Россия, 119991, г. Москва, Ленинский пр-т, 65, корп. 1; РИНЦ ID: 867674; ORCID: 0000-0003-2430-5311; e-mail: ivs@gubkin.ru

СТРОГОНОВ Андрей Юрьевич, старший преподаватель кафедры автоматизации технологических процессов, Российский государственный университет нефти и газа (национальный исследовательский университет) имени И.М. Губкина, Россия, 119991, г. Москва, Ленинский пр-т, 65, корп. 1; РИНЦ ID: 936562; ORCID 0000-0001-7994-5987; e-mail: strogonov.a@gubkin.ru

КРЮЧКОВ Алексей Вячеславович, к.т.н., доцент кафедры комплексной безопасности критически важных объектов, Российский государственный университет нефти и газа (национальный исследовательский университет) имени И.М. Губкина, Россия, 119991, г. Москва, Ленинский пр-т, 65, корп. 1; РИНЦ ID: 1047095; ORCID 0000-0002-5665-7058; e-mail: kruchkov.v@gubkin.ru

Information about the authors

Ilya V. SAMARIN, Dr. Sci. (Eng.), Docent, Head of Department of Automation of Technological Processes, Gubkin Russian State University of Oil and Gas (National Research University), Leninskiy Avenue, 65, Bldg. 1, Moscow, 119991, Russian Federation; ID RISC: 867674; ORCID: 0000-0003-2430-5311; e-mail: ivs@gubkin.ru

Andrey Yu. STROGONOV, Senior Lecturer of Department of Automation of Technological Processes, Gubkin Russian State University of Oil and Gas (National Research University), Leninskiy Avenue, 65, Bldg. 1, Moscow, 119991, Russian Federation; ID RISC: 936562; ORCID 0000-0001-7994-5987; e-mail: strogonov.a@gubkin.ru

Aleksey V. KRYUCHKOV, Cand. Sci. (Eng.), Associate Professor of Department of Integrated Security of Critical Facilities, Gubkin Russian State University of Oil and Gas (National Research University), Leninskiy Avenue, 65, Bldg. 1, Moscow, 119991, Russian Federation; ID RISC: 1047095; ORCID 0000-0002-5665-7058; e-mail: hook66@list.ru

Вклад авторов:

Самарин И.В. — *научное руководство; доработка текста; итоговые выводы.*

Строгонов А.Ю. — *концепция исследования; проведение экспериментов и моделирования; разработка программы для проведения расчетов и оценки результатов; написание исходного текста; итоговые выводы.*

Крючков А.В. — *доработка текста; проверка корректности и адекватности проводимых экспериментов и моделирования; тестирование программы для проведения расчетов и оценки результатов; итоговые выводы.*

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Contribution of the authors:

Samarin I.V. — *scientific guidance; revision of the text; final conclusions.*

Strogonov A.Yu. — *concept of the study; conducting experiments and modeling; developing a program for calculations and evaluation of results; writing the source text; final conclusions.*

Kruchkov A.V. — *revision of the text; verification of the correctness and adequacy of the experiments and simulations; testing of the program for calculations and evaluation of the results; final conclusions.*

The authors declare no conflicts of interests.

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 непереводимых названий собственных имен, приборов и других объектов, имеющих собственные названия, а также непереводимый 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 (Aimsand Purposes), Методы (Methods), Результаты (Results), Обсуждение (Discussion), Заключение (выводы) (Conclusions).

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

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

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

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

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

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

2.5. Ключевые слова на русском и английском языках (не менее 5 слов или коротких словосочетаний). Они указываются через точку с запятой. Недопустимо в качестве ключевых слов использовать термины общего характера (например, проблема, решение и т.п.), не являющиеся специфической характеристикой публикации. Использованные 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, сносок и примечаний;
- для рисунка: подрисуночной подписи и всех текстовых надписей на самом рисунке;
- для схемы: подписи к ней и всего содержания самой схемы.

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

При составлении References необходимо следовать схеме:

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

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

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

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

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

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

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