



СРАВНИТЕЛЬНАЯ ОЦЕНКА КРИТЕРИЕВ
ОПРЕДЕЛЕНИЯ КРИТИЧЕСКИХ ВЕЛИЧИН
ПАРЦИАЛЬНОЙ ПЛОТНОСТИ МОНООКСИДА
УГЛЕРОДА ПРИ РАСЧЕТЕ ВРЕМЕНИ БЛОКИРОВАНИЯ
ПУТЕЙ ЭВАКУАЦИИ ПРИ ПОЖАРЕ В ПОМЕЩЕНИИ

№1 ТОМ 31
2022

Издательство
**ПОЖАРОВАЗРЫВО-
БЕЗОПАСНОСТЬ**
НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКИЙ ЖУРНАЛ



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

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 02 ноября 2020 г.
Префикс DOI: 10.22227

РЕДАКЦИЯ:

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

Адрес редакции:

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

Адрес для переписки:

121352, Россия, г. Москва, а/я 26.

Тел./факс: +7 (495) 228-09-03,
+7 (909) 940-01-85.

E-mail: info@fire-smi.ru

https://www.fire-smi.ru

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

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

Подписано в печать 24.02.2022.

Выход в свет 28.02.2022.

Формат 60 × 84 1/8. Тираж 2000 экз.

Бумага мелованная матовая.

Печать офсетная. Цена свободная.

Распространяется по подписке.

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

Фото для оформления журнала взято с сайта: www.pexels.com

ГЛАВНЫЙ РЕДАКТОР:

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

ЗАМ. ГЛАВНОГО РЕДАКТОРА:

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

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

РЕДАКЦИОННАЯ КОЛЛЕГИЯ:

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

Роу Р.Л., профессор (Школа права Университета Джорджауна, Вашингтон, США)

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

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

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

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

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

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

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

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

Шилдс Т. Дж., профессор (Ольстерский университет, Ньютаунбиди, Великобритания)

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

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

СОДЕРЖАНИЕ

CONTENTS

ПРОЦЕССЫ ГОРЕНИЯ, ДЕТОНАЦИИ И ВЗРЫВА

COMBUSTION, DETONATION AND EXPLOSION PROCESSES

С.В. ПУЗАЧ, Р.А. ЧЕРЕПАНОВ, Р.Г. АКПЕРОВ
Сравнительная оценка критериев определения
критических величин парциальной плотности
монооксида углерода при расчете времени
блокирования путей эвакуации при пожаре в помещении

6

S.V. PUZACH, R.A. CHEREPANOV, R.G. AKPEROV
The comparative evaluation of the criteria used to determine
the critical values of the partial density of carbon monoxide
as part of the calculation of time to the blocking of escape
routes in case of a room fire

Н.Л. ПОЛЕТАЕВ
Исследование способности жесткого пенополиуретана
противостоять зажиганию искрой дуговой электросварки

14

N.L. POLETAEV
A research on rigid polyurethane foam resistibility to ignition
from an electric arc welding spark

БЕЗОПАСНОСТЬ ВЕЩЕСТВ И МАТЕРИАЛОВ

SAFETY OF SUBSTANCES AND MATERIALS

А.Н. ГАРАЩЕНКО, А.И. ДАНИЛОВ, С.П. АНТОНОВ,
С.В. МАРЧЕНКОВА, В.В. ПАВЛОВ
Теплотехнический анализ результатов огневых испытаний
под нагрузкой чугунных тубингов обделок тоннелей
метрополитена, обеспечение их рациональной
огнезащиты и заданной огнестойкости

21

A.N. GARASHCHENKO, A.I. DANILOV, S.P. ANTONOV,
S.V. MARCHENKOVA, V.V. PAVLOV
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

МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ, ЧИСЛЕННЫЕ МЕТОДЫ И КОМПЛЕКСЫ ПРОГРАММ

MATHEMATICAL MODELING, NUMERICAL METHODS AND PROGRAM COMPLEXES

И.В. САМАРИН, А.В. КРЮЧКОВ, А.Ю. СТРОГОНОВ
Подход к моделированию технического обслуживания
стационарных термохимических газосигнализаторов
на установках НПЗ

40

I.V. SAMARIN, A.V. KRYUCHKOV, A.Yu. STROGONOV
An approach to modeling the maintenance
of stationary thermochemical gas analyzers
at an oil refinery

Е.В. ГВОЗДЕВ
Об оценке состояния комплексной безопасности
на предприятиях нефтегазового комплекса России

49

E.V. GVOZDEV
The assessment of the integrated safety of Russian oil and
gas enterprises

ЭЛЕКТРОТЕХНИКА

ELECTRICAL ENGINEERING

А.И. НЕДОБИТКОВ, Б.М. АБДЕЕВ
Оценка несущей способности гнездовых контактов
розетки при экспертизе пожаров

65

A.I. NEDOBITKOV, B.M. ABDEEV
Evaluation of the bearing capacity of socket contacts within
the framework of a fire investigation

БЕЗОПАСНОСТЬ ЗДАНИЙ, СООРУЖЕНИЙ, ОБЪЕКТОВ

SAFETY OF BUILDINGS, STRUCTURES, OBJECTS

И.Р. ХАСАНОВ, С.А. ЗУЕВ, А.А. АБАШКИН, А.С. ЗУЕВА
Распространение пожара из открытой автостоянки,
расположенной на первом этаже жилого здания

77

I.R. KHASANOV, S.A. ZUEV, A.A. ABASHKIN, A.S. ZUEVA
The spread of fire from an open car park on the ground
floor of a residential building

М.А. ЛИПЛЕНКО, А.Н. БОРОДЕНКО, Г.В. МОСОЛОВ
Определение нагрузок на здания и сооружения
при внешних взрывах топливно-воздушных смесей

88

M.A. LIPLENKO, A.N. BORODENKO, G.V. MOSOLOV
The calculation of loads on buildings and structures caused
by outdoor explosions of the fuel-air mixture

ВОПРОС – ОТВЕТ

QUESTION – ANSWER

А.С. ХАРЛАМЕНКОВ
Пожарная опасность больших переходных
сопротивлений. От теории к практике. Часть 2

99

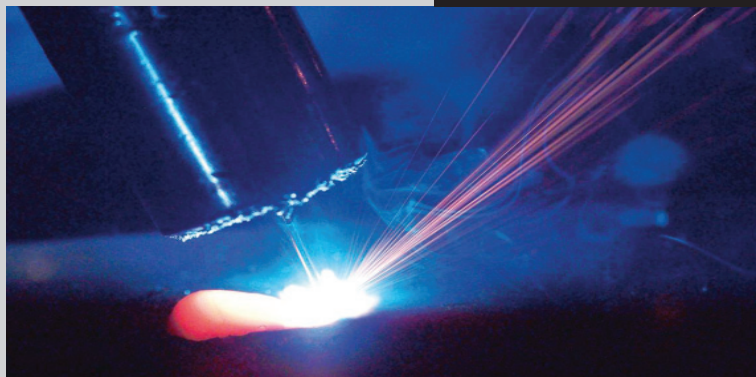
A.S. KHARLAMENKOV
The fire hazard of large transition resistances.
From theory to practice. Part 2

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

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



Сравнительная оценка критериев



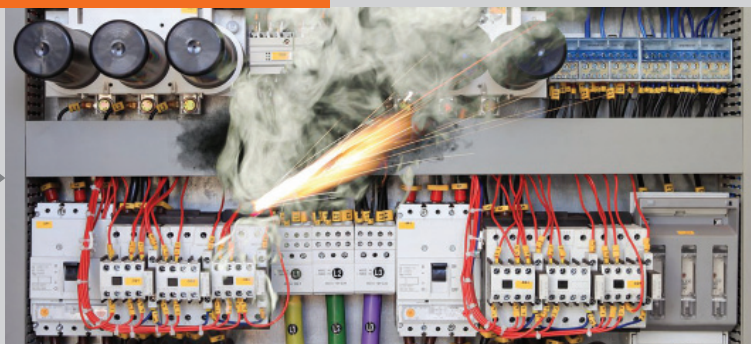
Способность противостоять зажиганию искрой дуговой электросварки



Теплотехнический анализ результатов



Комплексная безопасность на предприятиях нефтегазового комплекса



Пожарная опасность больших переходных сопротивлений

Стр. 6

Стр. 14

Стр. 21

Стр. 49

Стр. 99

КОМПЛЕКСНАЯ БЕЗОПАСНОСТЬ

пожарная • промышленная • производственная • экологическая

No. **1** VOL. 31
2022

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, Russian Federation

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 02, 2020.

DOI prefix: 10.22227.

EDITORIAL STAFF:

Executive editor **Dyadicheva A.A.**

Editor **Korzukhina L.B.**

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

Corrector **Svetlichnaya L.V.**

Layout **Goryunova O.G.**

Address of Editorial Staff:

26 Yaroslavskoe shosse, Moscow,
129337, Russia

Corresponding to: Post office box 26,
Moscow, 121352, Russian Federation.

Phone/Fax: +7 (495) 228-09-03,
+7 (909) 940-01-85.

E-mail: info@fire-smi.ru

https://www.fire-smi.ru

"Pozharovzryvobezопасnost/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 24.02.2022.

Date of publication 28.02.2022.

Format is 60 × 84 1/8.

Printing is 2000 copies.

Chalk-overlay mat paper.

Offset printing. Free price.

Journal sells subscription.

Printing house of the Publishing house

MISI – MGSU

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

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

SCIENTIFIC AND TECHNICAL JOURNAL

EXPLOSION



**FIRE AND
SAFETY**

ПОЖАРОВЗРЫВ БЕЗОПАСНОСТЬ

EDITOR-IN-CHIEF:

D.A. Korolchenko, Cand. 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 (Se-
menov Institute of Chemical Physics of Russian Academy of Sciences, Moscow, Russia)

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

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

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

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

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)

R.L. Roe, Professor (Georgetown University Law Center, Washington, United States)

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 Engi-
neering, Advisor of Russian Academy of Architecture and Construction Sciences (National
Research Moscow State University of Civil Engineering, Moscow, Russia)

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

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

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

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

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

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

T.J. Shields, Ph. D., Professor (Ulster University, Newtownabbey, Northern Ireland, UK)

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)



Ашоту Георгиевичу ТАМРАЗЯНУ — 70 лет

10 февраля 2022 года исполнилось 70 лет Ашоту Георгиевичу ТАМРАЗЯНУ — действительному члену Российской Инженерной Академии (РИА), Советнику РААСН, почетному работнику высшего профессионального образования РФ, доктору технических наук, профессору. Ашот Георгиевич окончил Ереванский политехнический институт (факультет ПГС) в 1974 году. В 1983 году в МИСИ защитил кандидатскую диссертацию, в 1998 — докторскую. Инженер, ведущий ученый, крупный специалист в области оценки риска и обеспечения безопасности зданий и сооружений от чрезвычайных ситуаций природного и техногенного характера (динамических и огневых), надежности и оптимизации железобетонных конструкций. За активное участие в развитии и становлении МИСИ-МГСУ как центра строительного образования и науки награжден почетной золотой, серебряной и бронзовой медалями МГСУ «За заслуги в строительном образовании».

Тамразян А.Г. проявил себя как талантливый организатор, под его руководством успешно проведено шесть крупных международных научных конференций. В 2014 году за успешную организацию и проведение II Международной конференции по бетону и железобетону Высшим инженерным советом Ашот Георгиевич награжден почетным знаком РИА «Инженерная доблесть». Тамразян А.Г. является членом экспертного совета ВАК РФ по строительству и архитектуре, диссертационных советов. Ашот Георгиевич выступает внимательным и справедливым рецензентом в составе Редакционной коллегии нашего журнала «Пожаровзрывобезопасность», а также других зарубежных и отечественных рецензируемых научно-технических журналов. Почетный доктор нескольких национальных университетов. Лауреат премии Правительства РФ в области науки и техники 2017 года. Автор более 500 научных трудов, в том числе 8 монографий, 6 учебных пособий, более 15 нормативных документов и методических пособий, авторских свидетельств, патентов. Им подготовлено 11 кандидатов и 4 доктора технических наук. За учебное пособие для вузов «Железобетонные и каменные конструкции. Специальный курс» (выдержало три издания) Тамразян А.Г. получил звание лауреата РААСН в 2018 году, а также удостоен первой премии и медали имени первопечатника Ивана Федорова, это пособие было признано лучшим учебным изданием в номинации «Университетская книга» 2019 года.

Ашот Георгиевич уделяет внимание и общественной работе. Он — председатель комитета по науке и образованию «Союза Армян России».

Редакция журнала от всей души поздравляет Ашота Георгиевича Тамразяна с юбилеем и желает крепкого здоровья, благополучия, новых научных успехов!

ПОЖАРОВЗРЫВБЕЗОПАСНОСТЬ/FIRE AND EXPLOSION SAFETY. 2022. Т. 31. № 1. С. 6–13
POZHAROVZRYVOBEZOPASNOST/FIRE AND EXPLOSION SAFETY. 2022; 31(1):6-13

НАУЧНАЯ СТАТЬЯ/RESEARCH PAPER

УДК 614.841

<https://doi.org/10.22227/0869-7493.2022.31.01.6-13>

Сравнительная оценка критериев определения критических величин парциальной плотности монооксида углерода при расчете времени блокирования путей эвакуации при пожаре в помещении

Сергей Викторович Пузач^{1✉}, Руслан Анатольевич Черепанов²,
Руслан Гянджавиевич Акперов¹

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

² Специальное управление ФПС № 20 МЧС России, г. Москва, Россия

АННОТАЦИЯ

Введение. При расчете времени блокирования путей эвакуации монооксидом углерода критериями наступления вышеуказанного времени могут являться критические величины парциальной плотности газа, токсодозы или относительной массы карбоксигемоглобина в крови человека. Однако сравнительный анализ влияния выбора критерия на время блокирования путей эвакуации этим газом не проводился.

Цели и задачи. Целью статьи является сравнительная оценка времен блокирования путей эвакуации монооксидом углерода, полученных с использованием различных методов определения критических значений плотности монооксида углерода. Для ее достижения проведены экспериментальные исследования процесса горения различных твердых и жидких горючих веществ и материалов в маломасштабной экспериментальной установке и на их основе выполнены расчеты времен блокирования путей эвакуации монооксидом углерода.

Теоретические основы. Поступление монооксида углерода при попадании в организм ингаляционным способом во время пожара рассчитывается по экспериментально измеренным парциальным плотностям СО с помощью математических моделей расчета токсодозы этого газа и образования карбоксигемоглобина в крови человека.

Результаты и их обсуждение. Представлены экспериментальные зависимости от времени испытаний средне-объемной плотности монооксида при горении оболочки кабелей ПВХ «low smoke», древесины (сосна), шоколада, масла трансформаторного и масла растительного. Получены теоретические зависимости от времени величин токсодозы, полученной человеком, а также массовой концентрации карбоксигемоглобина в крови человека для рассмотренных горючих материалов. Обнаружено, что времена блокирования путей эвакуации монооксидом углерода могут существенно отличаться друг от друга при использовании различных методов определения критических значений плотности монооксида углерода.

Выводы. В нормативных методах расчета времени блокирования путей эвакуации монооксидом углерода использование величины критической парциальной плотности СО может привести к существенному завышению вышеуказанного времени, что приведет к недооценке токсического воздействия на человека во время его эвакуации. Поэтому необходимо применять все рассмотренные в статье методы с целью выбора минимальной величины вышеуказанного времени.

Ключевые слова: токсичность; карбоксигемоглобин; вентиляция легких; пожарная нагрузка; горение

Для цитирования: Пузач С.В., Черепанов Р.А., Акперов Р.Г. Сравнительная оценка критериев определения критических величин парциальной плотности монооксида углерода при расчете времени блокирования путей эвакуации при пожаре в помещении // Пожаровзрывобезопасность/Fire and Explosion Safety. 2022. Т. 31. № 1. С. 6–13. DOI: 10.22227/0869-7493.2022.31.01.6-13

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

The comparative evaluation of the criteria used to determine the critical values of the partial density of carbon monoxide as part of the calculation of time to the blocking of escape routes in case of a room fire

Sergey V. Puzach¹✉, Ruslan A. Cherepanov², Ruslan G. Akperov¹

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

² Special Management FFS No. 20 Emercom of Russia, Moscow, Russian Federation

ABSTRACT

Introduction. Critical values of the partial density of gas, the toxic dose or relative mass of carboxyhemoglobin in human blood serve as the criteria determining the time to the blocking of escape routes due to the presence of carbon monoxide. However, the comparative analysis of the effect produced by the selected criterion on the time to the blocking of escape routes due to the presence of this gas has not been conducted yet.

Goals and objectives. The purpose of the article is to compare the values of the time to the blocking of escape routes by carbon monoxide obtained using various methods of determining the critical values of the carbon monoxide density. Towards this end, experimental studies on combustion processes of various solid and liquid combustible substances and materials were conducted in a small-scale test unit, and calculations of the time to the blocking of escape routes with carbon monoxide were made on their basis.

Theoretical fundamentals. The amount of carbon monoxide, inhaled during a fire, is calculated using experimentally measured partial densities of CO and mathematical models designated for the calculation of the toxic dose of this gas and formation of carboxyhemoglobin in human blood.

Results and discussion. Experimental dependencies between the testing time and medium-volume densities of monoxide emitted during the combustion of the "low smoke" PVC cable sheathing, timber (pinewood), chocolate, transformer oil and vegetable oil are presented. The authors obtained theoretical dependencies between the toxic dose and mass concentration of carboxyhemoglobin in human blood, on the one hand, and the time for the combustible materials, analyzed in the article. It has been found that the values of time to the blocking of escape routes due to the presence of carbon monoxide may differ significantly depending on the method used to determine the critical values of the carbon monoxide density.

Conclusions. Standard methods, used to calculate the time to the blocking of escape routes due to the presence of carbon monoxide, employ the value of the critical partial density which may involve a substantial overestimation of the above time frame and the underestimation of the toxic effect produced on a person in the process of his/her evacuation. Therefore, it is necessary to apply all methods, discussed in the article, to select the minimum value of the above time frame.

Keywords: toxicity; carboxyhemoglobin; lung ventilation; fire load; burning

For citation: Puzach S.V., Cherepanov R.A., Akperov R.G. The comparative evaluation of the criteria used to determine the critical values of the partial density of carbon monoxide as part of the calculation of time to the blocking of escape routes in case of a room fire. *Pozharovzryvobezopasnost/Fire and Explosion Safety*. 2022; 31(1):6-13. DOI: 10.22227/0869-7493.2022.31.01.6-13 (rus).

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

Введение

Гибель людей во время пожара происходит в основном из-за отравления токсичными газами [1–10]. Поэтому повышение надежности и достоверности расчета времени блокирования путей эвакуации токсикантами является актуальной проблемой.

Время блокирования путей эвакуации токсичным газом принимается равным промежутку времени от начала пожара до момента времени, когда плотность этого газа достигнет ее критического значения для человека на высоте рабочей зоны на путях эвакуации [11].

Существуют другие методы, основанные на критических величинах следующих параметров:

- по величине токсодозы, полученной человеком во время эвакуации [12, 13];
- в случае монооксида углерода по величине относительной массы карбоксигемоглобина в крови человека [14, 15].

Однако сравнительный анализ влияния выбора критических величин парциальной плотности газа, токсодозы или относительной массы карбоксигемоглобина в крови человека в случае монооксида углерода, как наиболее опасного токсиканта, на время блокирования путей эвакуации этим газом не проводился.

В работах [16, 17] показано, что полученные в маломасштабной экспериментальной установке

зависимости среднеобъемных величин парциальной плотности токсичного газа от среднеобъемной парциальной плотности кислорода справедливы в условиях крупномасштабного пожара в помещении. Поэтому на примере монооксида углерода выполним сравнение различных методов расчета времен блокирования путей эвакуации с использованием экспериментальных зависимостей парциальной плотности этого газа от времени, полученных при горении различных твердых и жидких горючих веществ и материалов в маломасштабной экспериментальной установке.

Целью статьи является сравнительная оценка времен блокирования путей эвакуации монооксидом углерода, полученных с использованием различных методов определения критических значений вышеуказанных параметров.

Для достижения поставленной цели:

- проведены в маломасштабной экспериментальной установке экспериментальные исследования параметров процесса горения различных горючих материалов;
- с помощью полученных экспериментальных зависимостей парциальной плотности монооксида углерода от времени выполнены расчеты времен блокирования путей эвакуации монооксидом углерода с использованием вышеуказанных подходов.

Критические значения параметров процесса распространения монооксида углерода в помещении

Критическая концентрация монооксида углерода при попадании в организм ингаляционным способом равна $\rho_{\text{CO,кр}} = 1,16 \cdot 10^{-3} \text{ кг/м}^3$ [11].

Расчет токсодозы проводится с использованием выражения [12, 13]:

$$D = \int_0^{\tau} \rho_{\text{CO}} d\tau, \quad (1)$$

где τ — время от начала горения, с;

D — токсодоза, $\text{кг} \cdot \text{с/м}^3$;

ρ_{CO} — парциальная плотность CO, кг/м^3 .

Критическое значение токсодозы равно $D_{\text{кр}} = 0,0408 \text{ кг} \cdot \text{с/м}^3$ [13].

Расчет массовой доли карбоксигемоглобина в крови проводится с использованием выражения [14, 15]:

$$\bar{M}_{\text{HbCO}} = \frac{k_W W}{M_{\text{Hb}}} \left(\frac{\mu_{\text{Hb}}}{n \mu_{\text{CO}}} + 1 \right) \int_0^{\tau} \rho_{\text{CO}} d\tau, \quad (2)$$

где $\bar{M}_{\text{HbCO}} = M_{\text{HbCO}}/M_{\text{Hb}}$ — массовая доля карбоксигемоглобина;

M_{HbCO} — масса карбоксигемоглобина, г;

M_{Hb} — масса гемоглобина, г;

W — объемная скорость вентиляции легких, л/мин;

k_W — коэффициент, равный отношению объемного расхода воздуха, поступающего в альвеолы легких, к объемной скорости вентиляции легких;

μ_{Hb} — молекулярная масса гемоглобина, кг/кмоль ;

μ_{CO} — молекулярная масса CO, кг/кмоль ;

n — число молекул CO в одной молекуле карбоксигемоглобина.

Критическое для человека значение массовой доли карбоксигемоглобина принимаем равным $\bar{M}_{\text{HbCO}} = 0,2$ (легкое отравление) [14, 15].

Маломасштабная экспериментальная установка и методика проведения экспериментов

Схема экспериментальной установки представлена на рис. 1 [17].

Камера сгорания 1 объемом $3 \cdot 10^{-3} \text{ м}^3$ изолирована теплоизоляционным материалом и объединена с экспозиционной камерой 2 переходным рукавом 3, имеющим шиберную задвижку для отсечения камеры сгорания от экспозиционной камеры. Электронагревательная панель 4, держатель образца 5 и термopара для контроля температуры в объеме камеры расположены в вышеуказанной камере.

Держатель для образцов представляет собой металлическую кювету размером $0,1 \times 0,1 \text{ м}$, находящуюся на весах 7 (погрешность $\pm 1 \text{ мг}$), расположенных на специальном столе, имеющем подвижную основу.

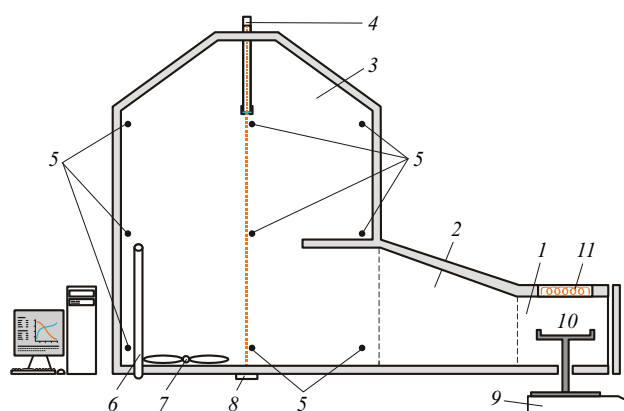


Рис. 1. Схема модифицированной экспериментальной установки: 1 — камера сгорания; 2 — переходной рукав; 3 — экспозиционная камера; 4 — лазерный модуль; 5 — термopары; 6 — зонд отбора газа; 7 — вентилятор; 8 — фоточувствительный элемент; 9 — электронные весы; 10 — держатель образца; 11 — электронагревательный излучатель [17]

Fig. 1. The layout of a modified experimental unit: 1 — combustion chamber; 2 — adapter hose; 3 — exposure chamber; 4 — laser module; 5 — thermocouples; 6 — gas sampling probe; 7 — fan; 8 — photosensitive element; 9 — electronic scales; 10 — sample holder; 11 — electric heating radiator [17]

Камера экспозиции имеет кубическую форму объемом $0,5887 \text{ м}^3$, переходящую сверху в конус. Шиберные отверстия для поддува воздуха расположены с двух противоположных стенок камеры.

Для регистрации плотности падающего теплового потока на испытуемый образец используется водоохлаждаемый датчик типа Гордона и милливольтметр. Измерения данного параметра проводятся с погрешностью не более 8 %.

Измерение концентрации оксида углерода (диапазон от 0 до 1 % об., погрешность не более 10 %) со снятием показаний каждые 5 секунд проводится газоанализатором, фиксирующим, кроме того, значения концентраций кислорода и диоксида углерода.

Испытания проводились в режиме пламенного горения образца при температуре от 500 до 750 °С в камере сгорания. При этом плотность падающего теплового потока находилась в пределах от 45 до 60 кВт/м². Пламенное горение, в отличие от режима тления, обеспечивало высокую скорость распространения продуктов терморазложения по объему экспозиционной камеры экспериментальной установки.

После прогрева нагревательным элементом камеры сгорания до достижения рабочей температуры при требуемой плотности падающего на образец теплового потока испытуемый материал помещают в держатель образца, закрывают дверцу камеры сгорания и открывают переходной рукав для поступления продуктов горения в экспонируемую камеру. В процессе испытаний необходимые параметры каждые 5 секунд записываются на персональный компьютер с помощью регистрирующих программ.

Исходные данные

В экспериментах исследовались следующие горючие материалы, находящиеся в зданиях различного функционального назначения:

- твердая горючая нагрузка: оболочки кабелей ПВХ «low smoke» (с пониженным дымовыделением), древесина (сосна), шоколад (горький, 55 % какао-продуктов);
- жидкая горючая нагрузка: масло трансформаторное, масло растительное.

Перед испытаниями образцы материала нарезались под размеры держателя образца (вкладыша) 10 × 10 см. Из кабеля вынималась его металлическая часть. Далее образцы кондиционировались, взвешивались и помещались в специальный держатель образцов (вкладыш).

При спокойном дыхании, когда нет дополнительных воздействий на дыхательный центр, принимаем для взрослого человека весом 75 кг $\dot{V} = 5,25 \text{ л/мин}$ и $k_W = 0,7$ [18].

Диффузионная способность легких по СО равна [18]:

- при спокойном дыхании: $D_{\text{л.СО}} = 20 \text{ мл/(мм рт. ст. · мин)}$;
- при физической нагрузке: $D_{\text{л.СО}} = 60 \text{ мл/(мм рт. ст. · мин)}$.

Расчеты проводим для взрослого человека и ребенка 6 лет.

Принимаем, что в организме взрослого человека средняя масса гемоглобина в крови человека составляет 708,8 г [19], у ребенка 6 лет — 204,8 г [19].

Молекулярная масса гемоглобина составляет $\mu_{\text{Hb}} = 68 \text{ 800 кг/кмоль}$ [19, 20], для СО — $\mu_{\text{СО}} = 28 \text{ кг/кмоль}$.

Результаты экспериментальных и теоретических исследований

Экспериментальные зависимости от времени испытаний среднеобъемной плотности монооксида углерода представлены на рис. 2, токсодозы СО — на рис. 3 и массовой доли карбоксигемоглобина — на рис. 4.

Из рис. 2–4 видно, что во всех экспериментах величины парциальной плотности СО, токсодозы и массовой доли карбоксигемоглобина достигали их критических значений.

На рис. 5 и в таблице приведены времена блокирования путей эвакуации монооксидом углерода, полученные с использованием различных методов их определения для испытываемых горючих материалов.

Достижение критических для человека значений параметров в вышеуказанных методах определяется по следующим параметрам:

- парциальная плотность СО [11];
- величина токсодозы СО (уравнение (1)) [12, 13];
- относительная масса карбоксигемоглобина в крови человека (уравнение (2)) [14, 15].

Из рис. 5 и таблицы видно, что при горении древесины определение времени блокирования путей эвакуации монооксидом углерода с использованием величины критической парциальной плотности СО может привести к существенной недооценке токсического воздействия на человека во время его эвакуации.

Например, вышеуказанное время в 2,3 раза больше времени, полученного при проведении расчета по величине относительной массы карбоксигемоглобина в крови взрослого человека, и в 2,1 раза — по сравнению с применением величины токсодозы.

В соответствии с нормативной литературой («СП 11.13130.2009. Места дислокации подразделений пожарной охраны. Порядок и методика определения. Приложение А (рекомендуемое). Методика определения необходимого времени эвакуации людей из помещения при пожаре») критические концентрации токсичных продуктов горения принимаются

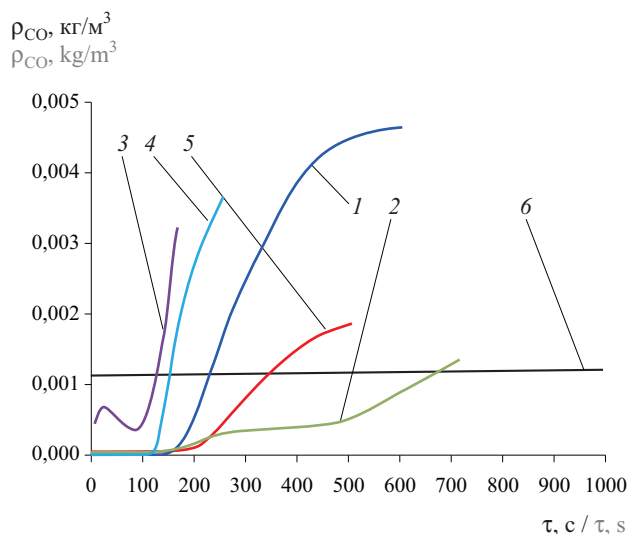


Рис. 2. Экспериментальные зависимости среднеобъемной парциальной плотности монооксида углерода от времени испытаний: 1 — кабели «low smoke»; 2 — древесина (сосна); 3 — масло трансформаторное; 4 — масло растительное; 5 — шоколад; 6 — критическое значение $\rho_{CO,cr}$

Fig. 2. Experimental dependencies between the medium-volume partial density of carbon monoxide and the testing time: 1 — “low smoke” cables; 2 — timber (pine wood); 3 — transformer oil; 4 — vegetable oil; 5 — chocolate; 6 — critical value of $\rho_{CO,cr}$

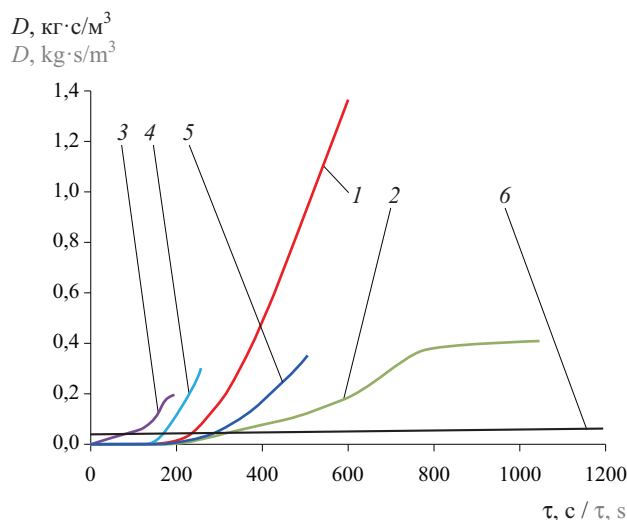


Рис. 3. Экспериментальные зависимости токсодозы монооксида углерода от времени испытаний: 1 — кабели «low smoke»; 2 — древесина (сосна); 3 — масло трансформаторное; 4 — масло растительное; 5 — шоколад; 6 — критическое значение $\rho_{CO,cr}$

Fig. 3. Experimental dependencies between the toxic dose of carbon monoxide and the testing time: 1 — “low smoke” cables; 2 — timber (pine wood); 3 — transformer oil; 4 — vegetable oil; 5 — chocolate; 6 — critical value of $\rho_{CO,cr}$

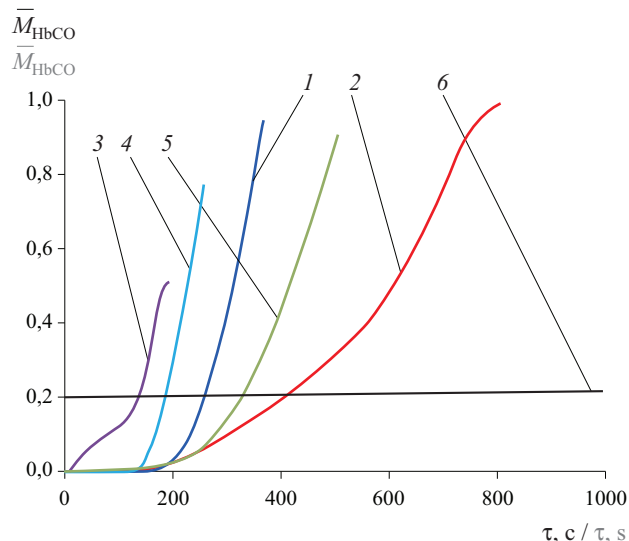


Рис. 4. Зависимости массовой доли карбоксигемоглобина от времени с начала испытаний в случае среднего взрослого человека: 1 — кабели «low smoke»; 2 — древесина (сосна); 3 — масло трансформаторное; 4 — масло растительное; 5 — шоколад; 6 — критическое значение $\bar{M}_{HbCO}$

Fig. 4. The dependence between the mass content of carboxyhemoglobin and the time as of the beginning of the testing process in the case of an average adult: 1 — “low smoke” cables; 2 — timber (pine wood); 3 — transformer oil; 4 — vegetable oil; 5 — chocolate; 6 — critical value of $\bar{M}_{HbCO}$

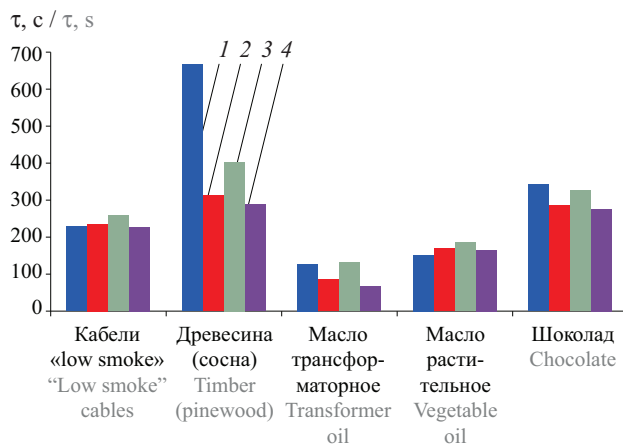


Рис. 5. Времена блокирования путей эвакуации монооксидом углерода, полученные для испытываемых горючих материалов с использованием различных параметров: 1 — парциальная плотность CO; 2 — токсодоза CO; 3 — массовая доля карбоксигемоглобина (средний взрослый человек); 4 — массовая доля карбоксигемоглобина (ребенок 6 лет)

Fig. 5. Values of the time to the blocking of escape routes due to the presence of carbon monoxide obtained for the tested combustible materials using various parameters: 1 — partial density of CO; 2 — toxic doses of CO; 3 — mass content of carboxyhemoglobin (average adult); 4 — mass content of carboxyhemoglobin (6 year old child)

Времена (с) блокирования путей эвакуации монооксидом углерода
Times (s) of blocking of escape routes with carbon monoxide

Параметр, по которому определяется время блокирования The parameter through which time to the blocking of the escape route is determined	Парциальная плотность СО (эксперименты) CO partial density (experiments)	Токсодоза СО (уравнение (1)) CO toxic dose (equation (1))	Массовая доля карбоксигемоглобина в крови (уравнение (2)) Mass content of carboxyhemoglobin in blood (equation (2))	
			взрослый adult	ребенок child
Кабели «low smoke» “Low smoke” cables	228	234	258	227
Древесина (сосна) Timber (pinewood)	666	312	402	288
Масло трансформаторное Transformer oil	126	84	132	65
Масло растительное Vegetable oil	152	168	184	164
Шоколад Chocolate	342	284	324	275

по литературным данным для условий одноразового воздействия на эвакуирующихся в течение нескольких минут при средних физических нагрузках и по критерию сохранения ими способности реально оценивать окружающую обстановку, уверенно принимать и выполнять соответствующие решения. Поэтому в случае горения древесины величину парциальной плотности СО нельзя использовать в качестве критерия наступления времени блокирования путей эвакуации по СО.

Выводы

В нормативных методах расчета времени блокирования путей эвакуации монооксидом углерода (Ме-

тодика определения расчетных величин пожарного риска в зданиях, сооружениях и строениях различных классов функциональной пожарной опасности. Приложение к приказу МЧС России от 30.06.2009 № 382. – М. : МЧС России, 2009. 45 с. и др.) использование величины критической парциальной плотности СО может привести к существенному завышению вышеуказанного времени, что приведет к недооценке токсического воздействия на человека во время его эвакуации. Поэтому необходимо применять все рассмотренные в статье методы, основанные на расчетах парциальной плотности СО, токсодозы СО и массовой доли карбоксигемоглобина в крови человека.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Белешников И.Л. Судебно-медицинская оценка содержания цианидов в органах и тканях людей, погибших в условиях пожара : автореф. дис. ... канд. мед. наук. СПб., 1996. 24 с.
2. Kuligowski E.D., Levin B.C. Toxicology of fire and smoke // *Inhalation Toxicology*. 2005. Vol. 2. Pp. 205–228. DOI: 10.1201/9781420037302.ch10
3. Иличкин В.С. Токсичность продуктов горения полимерных материалов: Принципы и методы определения. СПб. : Химия, 1993. 136 с.
4. Wilbur S., Williams M., Williams R., Scinicariello F., Klotzbach J.M., Diamond G.L. et al. Toxicological profile for carbon monoxide. Atlanta: Agency for toxic substances and disease registry, division of toxicology and human health sciences, 2012.
5. Purser D. Fire toxicity and toxic hazard analysis // *Proceedings of the Sixth International Seminar on Fire and Explosion Hazards*. 2011. Pp. 721–734. DOI: 10.3850/978-981-08-7724-8_11-01
6. McKenna S.T., Hull T.R. The fire toxicity of polyurethane foams // *Fire Science Reviews*. 2016. Vol. 5. Issue 1. DOI: 10.1186/s40038-016-0012-3
7. Dhabbah A.M. Ways of analysis of fire effluents and assessment of toxic hazard // *Journal of Analytical Sciences, Methods and Instrumentation*. 2015. Vol. 05. Issue 01. Pp. 1–12. DOI: 10.4236/jasmi.2015.51001
8. Purser D. Validation of additive models for lethal toxicity of fire effluent mixtures // *Polymer Degradation and Stability Journal*. 2012. Vol. 97. Issue 12. Pp. 2552–2561. DOI: 10.1016/j.polymdegradstab.2012.07.009

9. *Stec A.A., Hull T.R.* Assessment of the fire toxicity of building insulation materials // *Energy and Buildings*. 2011. Vol. 43. Issues 2–3. Pp. 498–506. DOI: 10.1016/j.enbuild.2010.10.015
10. *Kaczorek-Chrobak K., Fangrat J.* PVC-based copper electric wires under various fire conditions: toxicity of fire effluents // *Materials*. 2020. Vol. 13. Issue 5. Pp. 1111. DOI: 10.3390/ma13051111
11. *Кошмаров Ю.А., Пузач С.В., Лебедченко О.С., Нгуен Тхань Хай.* Прогнозирование опасных факторов пожара в помещении. М. : Академия ГПС МВД России, 2021. 148 с.
12. *Alexeeff G.V., Puckham S.C.* Evaluation of smoke toxicity using concentration-time products // *Journal of Fire Sciences*. 1984. Vol. 2. Issue 5. Pp. 362–379. DOI: 10.1177/073490418400200504
13. *Hartzell G.E., Emmons H.W.* The fractional effective dose model for assessment of toxic hazards in fires // *Journal of Fire Sciences*. 1988. Vol. 6. Issue 5. Pp. 356–362. DOI: 10.1177/073490418800600504
14. *Пузач С.В., Нгуен Там Дат.* Критические времена воздействия монооксида углерода на человека при пожаре в помещении // *Пожаровзрывобезопасность/Fire and Explosion Safety*. 2016. Т. 25. № 11. С. 27–34. DOI: 10.18322/PVB.2016.25.11.27-34
15. *Пузач С.В., Нгуен Там Дат.* Новый подход к расчету критических времен воздействия монооксида углерода на человека при пожаре в помещении // *Безопасность жизнедеятельности*. 2017. № 1 (193). С. 48–56.
16. *Пузач С.В., Доан В.М., Нгуен Т.Д., Сулейкин Е.В., Акперов Р.Г.* Образование, распространение и воздействие на человека токсичных продуктов горения при пожаре в помещении: монография / под ред. С.В. Пузача. М. : Академия ГПС МЧС России, 2017. 130 с.
17. *Пузач С.В., Болдрушкиев О.Б.* Определение удельного коэффициента образования и критической парциальной плотности циановодорода и монооксида углерода при пожаре в помещении // *Пожаровзрывобезопасность/Fire and Explosion Safety*. 2019. Т. 25. № 5. С. 19–26. DOI: 10.18322/PVB.2019.28.05.19-26
18. *Внутренние болезни. В 10 кн. Кн. 6. Болезни дыхательных путей. Болезни почек и мочевых путей / пер. с англ. ; под ред. Е. Браунвальда, К.Дж. Иссельбахера, Р.Г. Петерсдорфа и др. М. : Медицина, 1995. 416 с.*
19. *Физиология человека : учебник / под ред. В.М. Покровского, Г.Ф. Коротько. 2-е изд., перераб. и доп. М. : Медицина, 2003. 656 с.*
20. *Фаткуллин К.В., Гильманов А.Ж., Костюков Д.В.* Клиническое значение и современные методологические аспекты определения уровня карбокси- и метгемоглобина в крови // *Практическая медицина*. 2014. № 3 (79). С. 17–21. URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=21844992>

REFERENCES

1. *Beleshnikov I.L.* *Forensic medical assessment of the content of cyanide in the organs and tissues of people who died in a fire : abstract dissertations of a candidate of medical sciences*. Saint Petersburg, 1990; 24. (rus).
2. *Kuligowski E.D., Levin B.C.* Toxicology of fire and smoke. *Inhalation Toxicology*. 2005; 2:205-228. DOI: 10.1201/9781420037302.ch10
3. *Ilichkin V.C.* *Toxicity of combustion products of polymeric materials. Principles and methods of determination*. Moscow, Chemistry Publ., 1993; 136. (rus).
4. *Wilbur S., Williams M., Williams R., Scinicariello F., Klotzbach J.M., Diamond G.L. et al.* *Toxicological profile for carbon monoxide*. Atlanta : Agency for toxic substances and disease registry, division of toxicology and human health sciences, 2012.
5. *Purser D.* Fire toxicity and toxic hazard analysis. *Proceedings of the Sixth International Seminar on Fire and Explosion Hazards*. 2011; 721-734. DOI: 10.3850/978-981-08-7724-8_11-01
6. *McKenna S.T., Hull T.R.* The fire toxicity of polyurethane foams. *Fire Science Reviews*. 2016; 5(1). DOI: 10.1186/s40038-016-0012-3
7. *Dhabbah A.M.* Ways of analysis of fire effluents and assessment of toxic hazard. *Journal of Analytical Sciences, Methods and Instrumentation*. 2015; 05(01):1-12. DOI: 10.4236/jasmi.2015.51001
8. *Purser D.* Validation of additive models for lethal toxicity of fire effluent mixtures. *Polymer Degradation and Stability Journal*. 2012; 97(12):2552-2561. DOI: 10.1016/j.polymdegradstab.2012.07.009
9. *Stec A.A., Hull T.R.* Assessment of the fire toxicity of building insulation materials. *Energy and Buildings*. 2011; 43(2-3):498-506. DOI: 10.1016/j.enbuild.2010.10.015
10. *Kaczorek-Chrobak K., Fangrat J.* PVC-based copper electric wires under various fire conditions: toxicity of fire effluents. *Materials*. 2020; 13(5):1111. DOI: 10.3390/ma13051111
11. *Koshmarov Yu.A., Puzach S.V., Lebedchenko O.S., Nguyen Thanh Hai.* *Prediction of fire dynamics factors in the room*. Moscow, State Fire Academy of Emercom of Russia Publ., 2021; 148. (rus).

12. Alexeeff G.V., Puckham S.C. Evaluation of smoke toxicity using concentration-time products. *Journal of Fire Sciences*. 1984; 2(5):362-379. DOI: 10.1177/073490418400200504
13. Hartzell G.E., Emmons H.W. The fractional effective dose model for assessment of toxic hazards in fires. *Journal of Fire Sciences*. 1988; 6(5):356-362. DOI: 10.1177/073490418800600504
14. Puzach S.V., Nguyen Tat Dat. Critical values of exposure time of carbon monoxide effects on human during the fire in premises. *Pozharovzryvbezopasnost/Fire and Explosion Safety*. 2016; 25(11):27-34. DOI: 10.18322/PVB.2016. 25.11.27-34 (rus).
15. Puzach S.V., Nguyen Tat Dat. New approach to calculation critical times of exposure of carbon monoxide on human at a fire in a room. *Bezopasnost zhiznedeyatel'nosti/ Life Safety*. 2017; 1(193):48-56. (rus).
16. Puzach S.V., Doan Viet Mahn, Nguyen Dat Tat, Suleykin E.V., Akperov R.G. *Generation, distribution and human exposure to toxic combustion products from indoor fire : monograph*. Puzach S.V. (ed). Moscow, State Fire Academy of Emercom of Russia Publ., 2017; 130. (rus).
17. Puzach S.V., Boldrushkiev O.B. Defining the specific formation coefficient and the critical partial density of hydrogen cyanide at the fire indoors. *Pozharovzryvbezopasnost/Fire and Explosion Safety*. 2019; 25(5):19-26. DOI: 10.18322/PVB.2019.28.05.19-26 (rus).
18. *Harrison's principles of internal medicine*. 11th ed. Braunvald E., Isselbakher K. Dzh., Petersdorf R.G. et. al. (eds.). New York, McGraw – Hill Book Company, 1987. (rus).
19. *Human Physiology : Textbook*. 2nd ed. Pokrovskiy V.M., Korotko G.F. (eds.). Moscow, Meditsina Publ., 2003; 656. (rus).
20. Phatkullin K.V., Gilmanov A. Zh., Kostyukov D.V. Clinical importance and modern methodological aspects of determining the level of carboxy- and methaemoglobin in blood. *Prakticheskaya meditsina/ Practical Medicine*. 2014; 3(79):17-21. URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=21844992> (rus).

*Поступила 13.09.2021, после доработки 11.10.2021; принята к публикации 29.10.2021
Received September 13, 2021; Received in revised form October 11, 2021; Accepted October 29, 2021*

Информация об авторах

ПУЗАЧ Сергей Викторович, д-р техн. наук, 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; РИНЦ ID: 18265; Scopus Author ID: 7003537835; ResearcherID: U-2907-2019; ORCID: 0000-0001-7234-1339; e-mail: puzachsv@mail.ru

ЧЕРЕПАНОВ Руслан Анатольевич, заместитель начальника, начальник специального отдела № 11, Специальное управление ФПС № 20 МЧС России, Россия, 103274, г. Москва, Краснопресненская набережная, 2; ORCID 0000-0003-1043-4817; e-mail: docent-80@yandex.ru

АКПЕРОВ Руслан Гянджавиевич, канд. техн. наук, доцент кафедры инженерной теплофизики и гидравлики, Академия Государственной противопожарной службы Министерства Российской Федерации по делам гражданской обороны, чрезвычайным ситуациям и ликвидации последствий стихийных бедствий, Россия, 129366, г. Москва, ул. Бориса Галушкина, 4; РИНЦ ID: 766879; ORCID: 0000-0002-2524-8710; e-mail: akperov01@mail.ru

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

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Information about the authors

Sergey V. PUZACH, Dr. Sci. (Eng.), Professor, Honoured 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; ID RISC: 18265; Scopus Author ID: 7003537835; ResearcherID: U-2907-2019; ORCID: 0000-0001-7234-1339; e-mail: puzachsv@mail.ru

Ruslan A. CHEREPANOV, deputy head, head of special department No. 11, Special Management FFS No. 20 Emercom of Russia, Krasnopresnenskaya Embankment, 2, Moscow, 103274, Russian Federation; ORCID 0000-0003-1043-4817; e-mail: docent-80@yandex.ru

Ruslan G. AKPEROV, Cand. Sci. (Eng.), Associate Professor, Engineering Thermophysics and Hydraulics Department, the State Fire Academy of the Ministry of Russian Federation for Civil Defense, Emergencies and Elimination on Consequences of Natural Disasters, Borisa Galushkina St., 4, Moscow, 129366, Russian Federation; ID RISC: 766879; ORCID: 0000-0002-2524-8710; e-mail: akperov01@mail.ru

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

The authors declare no conflicts of interests.

Исследование способности жесткого пенополиуретана противостоять зажиганию искрой дуговой электросварки

Николай Львович Полетаев✉

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

АННОТАЦИЯ

Введение. Производство пожарно-технической экспертизы предполагает, что искры дуговой электросварки (далее — искры) являются эффективными источниками зажигания. Однако вероятность зажигания искрой горючего материала зависит от времени контакта между ними. В данной работе экспериментально показано отсутствие зажигания искрами вертикальной гладкой стенки из горючего жесткого пенополиуретана (ППУ). Для объяснения данного факта рассчитали время контакта искры и стенки τ_{int} , которое сравнили с оценкой минимального времени контакта τ_{min} , необходимого для зажигания стенки.

Образец и методика испытаний. Воздействию искр (мощность дуги до 6 кВт, ток до 160 А) подвергался участок стенки из ППУ, расположенной на расстоянии от 0,1 до 0,15 м от дуги. Отдельный опыт продолжался до выгорания электрода.

Результаты исследований и их обсуждение. Ни в одном из опытов воспламенить образец ППУ искрами не удалось. Искры отскакивали от образца ППУ и падали вниз. Характерные размеры застывших капель железа принадлежали диапазону от 0,2 до 3 мм.

Оценка τ_{int} . Использовали модель упругого взаимодействия капли расплавленного железа с жесткой стенкой в предположении сохранения суммы потенциальной энергии капли, связанной с ее поверхностью, и кинетической энергией растекания капли при сплющивании. Наибольшее время контакта достигается для капель максимального диаметра (3 мм): $\tau_{int} \approx 0,004$ с.

Оценка τ_{min} . Использовали экспериментальное моделирование процесса, при котором воздействие капли железа на ППУ заменяли регулируемым по времени воздействием пламени деревянного цилиндра диаметром 6 мм, горящего с торца. Получили $\tau_{min} \approx 0,3$ с. Соотношение $\tau_{int} \ll \tau_{min}$ объясняет отсутствие воспламенения стенки из ППУ искрами дуговой электросварки.

Выводы. Искры дуговой электросварки диаметром до 3 мм не воспламеняют вертикальную стенку из жесткого горючего пенополиуретана при боковом соударении. Отсутствие воспламенения объясняется малым временем контакта искры со стенкой.

Ключевые слова: дуговой разряд; капля железа; горючий утеплитель; вероятность воспламенения; задержка зажигания

Для цитирования: Полетаев Н.Л. Исследование способности жесткого пенополиуретана противостоять зажиганию искрой дуговой электросварки // Пожаровзрывобезопасность/Fire and Explosion Safety. 2022. Т. 31. № 1. С. 14–20. DOI: 10.22227/0869-7493.2022.31.01.14-20

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

A research on rigid polyurethane foam resistibility to ignition from an electric arc welding spark

Nikolay L. Poletaev✉

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

ABSTRACT

Introduction. A fire investigation assumes that electric arc welding sparks (hereinafter referred to as “sparks”) are effective sources of ignition. However, the spark ignition of a combustible material depends on the contact time. This work has experimentally proven that a smooth vertical wall, made of combustible rigid polyurethane

foam (PUF), is not subjected to spark ignition. To explain this fact, the author calculated the time of contact between the spark and the wall τ_{int} , and compared it with the minimal estimated contact time τ_{min} required to ignite the wall.

The sample and the testing procedure. Sparks (the arc power up to 6 kW, the current up to 160 A) reached the PUF wall located at a distance of 0.1–0.15 m from the arc. An everyone experiment was continued until the electrode was burned down.

Research results and discussion. Neither attempt to inflame the PUF sample by a spark was successful. Sparks bounced off the PUF sample and fell down. The characteristic dimensions of cooled iron droplets ranged from 0.2 to 3 mm.

An evaluation of τ_{int} . The authors applied a model of elastic interaction between a drop of molten iron and a rigid wall, assuming that the sum of the potential energy of the drop, associated with its surface, and the kinetic energy of a spreading drop, if flattened, is conserved. The longest contact time is achieved for drops, featuring the maximum diameter of 3 mm: $\tau_{int} \approx 0.004$ s.

Estimation τ_{min} . The authors applied the experimental modeling of the process, whereby the effect of an iron drop on PUF was replaced by the time-controlled effect, produced by a wooden cylinder (6 mm in diameter), inflamed at one edge. $\tau_{min} \approx 0.3$ s. The ratio $\tau_{int} \ll \tau_{min}$ explains the inability of electric arc welding sparks to ignite the PUF wall.

Conclusions. Electric arc welding sparks, having a diameter of up to 3 mm, cannot ignite a vertical wall, made of rigid combustible polyurethane foam, in case of a side impact. The lack of ignition is explained by the short-term contact between the spark and the surface of the polyurethane foam.

Keywords: arc discharge; drop of iron; combustible insulation; combustion probability; ignition delay

For citation: Poletaev N.L. A research on rigid polyurethane foam resistibility to ignition from an electric arc welding spark. *Pozharovzryvobezopasnost/Fire and Explosion Safety*. 2022; 31(1):14-20. DOI: 10.22227/0869-7493.2022.31.01.14-20 (rus).

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

Введение

Осенью 2019 года на складе пестицидов в промышленной зоне г. Рязани произошел пожар, который привел к уничтожению имущества в крупном размере. Среди причин возникновения пожара наиболее вероятной считалось загорание искрами дуговой электросварки горючего утеплителя — жесткого пенополиуретана, нанесенного с внутренней стороны на потолок и стены склада. Основаниями для повышенного внимания к этой причине пожара являлись, в частности, наличие внутри склада сварочного аппарата, предназначенного для проведения цикла профилактических сварочных работ вблизи стен склада на уровне около 1 м от пола, и высокая зажигающая способность искр дуговой электросварки [1]. Последняя особенность позволяла специалистам, расследовавшим упомянутый выше пожар, полагать, что загорание стенки искрами дуговой электросварки является самым вероятным событием, что, вообще говоря, не очевидно [2], даже в рассматриваемом здесь случае горючего пенополиуретана (который нередко ингибируют для перевода в группу трудногорючих материалов [3–5]).

Следует отметить, что стандарт для определения зажигающей способности искр дуговой электросварки, представляющих капли металла с температурой, превышающей температуру плавления металла (для железа 1538 °C [6]), отсутствует. А в научных работах данная способность определяется для условий наи-

более вероятного проявления, независимо от агрегатного состояния горючего материала: твердого [7–11], гелеобразного [12, 13], жидкого [14], порошкообразного [15]. А именно небольшая проба нагретого или расплавленного (капля) металла размещается сверху слоя горючего материала, что обеспечивает максимальное время взаимодействия источника загорания с горючим материалом.

Для рассмотренной выше причины пожара на складе взаимодействие искры с вертикальной стенкой из жесткого пенополиуретана происходит в режиме соударения с последующим рассеянием назад. В этом случае времени взаимодействия искры с горючим материалом может не хватить для обеспечения воспламенения стенки и самостоятельного распространения пламени по стенке [16].

В настоящей работе экспериментально исследована возможность загорания вертикальной стенки из жесткого пенополиуретана искрами дуговой электросварки, а также произведена расчетная оценка времени взаимодействия искры со стенкой и экспериментальная оценка минимального времени, необходимого для загорания стенки.

Характеристика объекта испытаний

Исследовался образец пенополиуретана «Владипур ППУ-3017/Н30» (далее — ППУ), представляющий собой твердый материал белого цвета. ППУ имел форму параллелепипеда с размерами около

600 × 600 × 100 мм. Наружная поверхность образца (сторона, с которой производится напыление утеплителя на поверхность склада) слегка волнистая. Плотность ППУ соответствует жестким пенополиуретанам (от 30 до 86 кг/м³) [17]. Согласно сопроводительной документации, образец относится к группе горючести ГЗ (нормальногорючий) и к группе воспламеняемости ВЗ (легковоспламеняемый). Образец характеризуется следующими показателями горючести [6, 17]: температура начала разложения с выделением горючих газов 230 °С; теплота сгорания 26 МДж/кг; температура самовоспламенения 440 °С.

Процедура выполнения исследования

Техника эксперимента состояла в организации периодического дугового разряда (на расстоянии 10–15 см от геометрического центра поверхности (600 × 600 мм) образца ППУ, расположенного вертикально, при котором искры сварки воздействовали на центральную часть этой поверхности).

Для производства искр использовался сварочный аппарат инвертор Ресанта САИ-160 К мощностью 6 кВт с электродами Ресанта МР-3 диаметром от 2 до 4 мм и длиной от 350 до 450 мм. Ток дуги составлял до 150 А.

Результаты исследований и их обсуждение

Разумно предположить, что отсутствие зажигания вызвано тем обстоятельством, что время контакта капли с образцом ППУ оказывается недостаточным для воспламенения горючего материала. Для проверки этого предположения теоретически оценили время τ_{int} взаимодействия капли с образцом ППУ и экспериментально оценили минимальное время τ_{min}

такого взаимодействия, приводящего к устойчивому горению образца ППУ. Ниже приводятся оценки τ_{int} и τ_{min} и их сравнение.

Оценка τ_{int}

Рассмотрим столкновение капли расплавленного железа, движущейся горизонтально, с гладкой вертикальной стенкой из ППУ. С учетом данных стандарта ГОСТ 12.1.004–91 «Система стандартов безопасности труда. Пожарная безопасность. Общие требования» скорость капель u не превышает 4 м/с, радиус капель r не превышает 1,5 мм. Как показал опыт, капли после соударения с такой стенкой отскакивают в обратную сторону без дробления на фрагменты и без заметного снижения скорости по сравнению с u .

Для оценки τ_{int} по порядку величины рассматривается следующая упрощенная математическая модель процесса. Поверхность стенки считается недеформируемой. Форма летящей капли — сферическая, что обусловлено стремлением к минимуму площади поверхности капли и связанной с этой площадью потенциальной энергии

$$E_{\sigma} = s\sigma,$$

где s — площадь поверхности капли, м²; для сферической капли $s = 4\pi r^2$;

$\sigma = 1,87$ Н/м — коэффициент поверхностного натяжения жидкого железа, численное значение параметра приводится для температуры плавления железа [18]. Кинетическая энергия капли составляет

$$E_u = \rho v u^2 / 2,$$

где $\rho = 7800$ кг/м³ — удельная масса капли [18];
 $v = 4\pi r^3 / 3$ — объем капли.

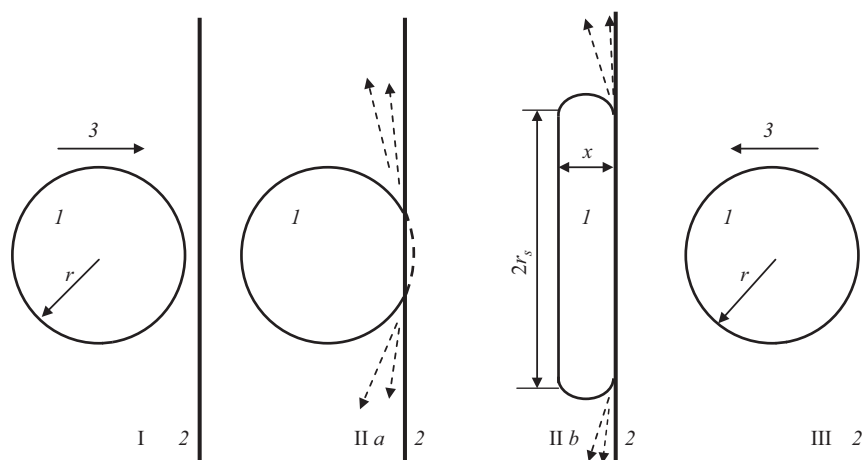


Рис. 1. Геометрия капли I до I, во время II и после III взаимодействия со стенкой из ППУ 2; 3 — направление движения капли. I — движение капли к стенке; II — остановка капли: а — слабая деформация, б — сильная деформация; III — движение капли от стенки. Пунктирные стрелки — направления потока продуктов газификации ППУ

Fig. 1. The shape of the drop I before I, during II and after III interaction with the PPU wall 2; 3 — the drop direction. I — the drop travels towards the wall; II — the drop stops: a — slight deformation, b — strong deformation; III — the drop travels away from the wall. Dotted arrows indicate directions of the flow of the PPU gasification products

Будем полагать, что соударение капли со стенкой (см. рис. 1) представляет процесс перехода кинетической энергии капли в потенциальную до полной остановки капли и последующий переход потенциальной энергии в кинетическую (отскок капли от стенки). В процессе соударения капля сплющивается вплоть до фигуры, по форме, подобной плоскому диску с округлым торцом. Трением внутреннего движения жидкости в капле пренебрегается.

Величина максимальной деформации капли зависит от отношения E_u/E_σ , которое по порядку величины совпадает с числом Вебера [19]

$$We = \rho u^2 r / \sigma.$$

При $We < 1$ максимальное искажение формы капли незначительно и схематично представлено на рис. 1 фрагментом II а. Пунктиром изображен сферический сегмент капли, выдавленный стенкой в объем капли. В случае $We \gg 1$ искажение формы капли значительное и представлено на рис. 1 фрагментом II б. Паровая прослойка между поверхностью капли и стенкой не показана.

Согласно исходным данным: скорость капель от 0 до 4 м/с; радиус капель от 0,2 до 1,5 мм. В последующих численных примерах будет использоваться средняя скорость капель $u = 2$ м/с и максимальное значение радиуса капель $r = 1,5$ мм, как отвечающее наибольшему запасу тепловой энергии. Отсюда имеем $We = 25 \gg 1$, то есть реализуется случай II б на схеме рис. 1.

Для оценки τ_{int} построим уравнение изменения параметра r_s со временем в процессе столкновения капли со стенкой. Сохранение объема капли дает условие $\pi r_s^2 x = v$, дифференцируя которое по времени получим соотношение

$$r'_s = (-x')(r_s/2x), \quad (1)$$

где штрих (') при переменной означает дифференцирование переменной по времени;

r'_s — максимальная скорость растекания капли-диска (на периферии);

$(-x')$ — скорость убыли толщины капли-диска.

С учетом линейной зависимости скорости растекания по стенке капли-диска от расстояния до оси диска (ввиду неразрывности радиального течения внутри капли) несложно оценить текущее значение кинетической энергии растекания капли по стенке: $E_u = \rho v (r'_s)^2 / 4$. Потенциальная энергия, связанная с наличием поверхности у капли, составит $E_\sigma = 2\pi (r_s)^2 \sigma$. Сумма энергий постоянна

$$\rho v (r'_s)^2 / 4 + 2\pi (r_s)^2 \sigma = \text{const.}$$

Дифференцируя это соотношение по времени с учетом (1), получим уравнение, описывающее гармоническое колебание $r_s'' + 3\sigma r_s / \rho r^3 = 0$. Время взаимодействия капли со стенкой составляет половину периода такого колебания

$$\tau_{int} = \pi \sqrt{\frac{\rho r^3}{6\sigma}}. \quad (2)$$

Подставляя в (2) численные значения параметров ($r = 1,5$ мм), получим оценку $\tau_{int} = 4 \cdot 10^{-3}$ с. Отметим, что время взаимодействия не зависит от начальной скорости капли u .

Оценка τ_{min}

Оценка τ_{min} основывалась на предположении, что процесс зажигания стенки каплей металла (если бы он состоялся) содержит следующие последовательные этапы:

- импульсный нагрев капель поверхности стенки с расчетной площадью порядка $0,3 \text{ см}^2$, тормозящийся появлением между каплей и стенкой прослойки из горючих газообразных продуктов разложения ППУ (далее — паров) [20];
- образование и зажигание (поверхностью капли) паровоздушной смеси с возникновением вспышки

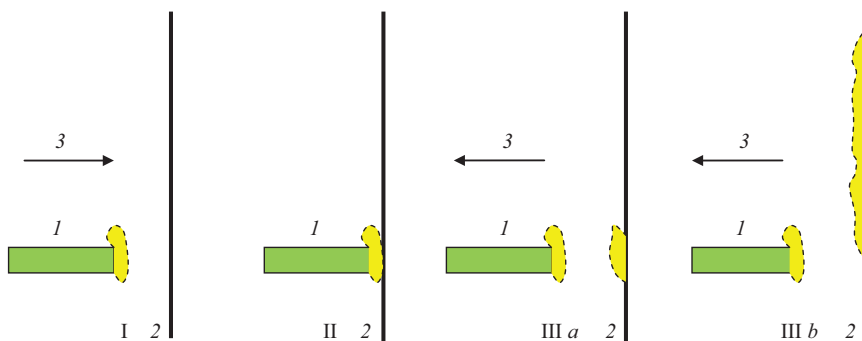


Рис. 2. Схема взаимодействия пробного пламени деревянного цилиндра I со стенкой из ППУ 2; 3 — направление движения цилиндра. I — движение к стенке; II — остановка цилиндра; III — движение от стенки: а — вспышка, б — воспламенение. Цилиндр выделен светло-зеленой заливкой. Пламя выделено желтой заливкой и имеет контур, изображенный пунктиром

Fig. 2. The pattern of interaction between the flame of a wooden cylinder I with a PPU wall 2; 3 — the direction of the cylinder. I — the cylinder travels towards the wall; II — the cylinder stops; III — the cylinder travels away from the wall: a — a flash, b — ignition. The cylinder is highlighted in the light green colour. The flame is highlighted in yellow and has a dotted outline

ки, прогревающей прилегающие участки поверхности ППУ;

- эстафета распространения пламени (вспышка → свежий пар → паровоздушная смесь → вспышка смеси → свежий пар → ...) на поверхности стенки.

С учетом предложенной схемы зажигания стенки различающееся по времени воздействие капли железа на стенку экспериментально моделировалось воздействием пламени горящего с торца деревянного цилиндра диаметром 6 мм, который сначала подносили к поверхности стенки (зазор составлял около 1 мм), а затем через определенный промежуток времени удаляли (см. рис. 2).

Время воздействия пламени источника зажигания менялось с точностью около 0,1 с. Визуально регистрировалось возникновение на поверхности стенки дополнительного (к порождаемому источником зажигания) пламени и способность этого пламени распространяться вдоль стенки на расстояние, заметно превышающее поперечный масштаб источника зажигания. Отмечены два варианта результата единичного опыта: кратковременное горение без существенного распространения пламени по поверхности стенки (вспышка), горение, распространяющееся вверх по стенке на значительное расстояние (воспламенение). Переход от первого варианта ко второму осуществлялся с превышением длительностью воз-

действия пламени источника зажигания величины 0,3 с. Отсюда следует, что $\tau_{\min} \approx 0,3$ с.

Таким образом, вышеприведенные оценки показали, что $\tau_{int} \ll \tau_{\min}$, чем и объясняется отсутствие воспламенения стенки из ППУ искрами дуговой электросварки.

Выводы

Искры дуговой электросварки диаметром до 3 мм не воспламеняют вертикальную стенку из жесткого горючего пенополиуретана марки «Владипур ППУ-3017/Н30» при боковом соударении. Отсутствие воспламенения объясняется малым временем контакта искры с поверхностью пенополиуретана.

Расчетная оценка времени τ_{int} контакта искры с поверхностью пенополиуретана при соударении дает $4 \cdot 10^{-3}$ с. Экспериментальная оценка минимального времени контакта искры с поверхностью пенополиуретана, приводящего к возникновению пламени, распространяющегося по стенке, дает величину порядка 0,3 с, недостижимую при соударении.

Высокая зажигающая способность искр дуговой электросварки не является безусловным основанием для утверждения о высокой вероятности воспламенения такими искрами утеплителя из пенополиуретана марки «Владипур ППУ-3017/Н30», покрывавшего стены помещения склада в промышленной зоне г. Рязани, в котором осенью 2019 произошел пожар.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Статистика пожаров за 2020 год. Статистический сборник: Пожары и пожарная безопасность в 2020 году / под общ. ред. Гордиенко Д.М. М. : ВНИИПО, 2021.
2. Song Jiayun, Wang Supan, Chen Haixiang. Safety distance for preventing hot particle ignition of building insulation materials // Theoretical and Applied Mechanics Letters. 2014. Vol. 4. Issue 3. P. 034005. DOI: 10.1063/2.1403405
3. Tang Gang, Zhou Lin, Zhang Ping, Han Zhongqiang, Chen Depeng, Liu Xiuyu et al. Effect of aluminum diethylphosphinate on flame retardant and thermal properties of rigid polyurethane foam composites // Journal of Thermal Analysis and Calorimetry. 2020. Vol. 140. Pp. 625–636. DOI: 10.1007/s10973-019-08897-z
4. Pang Xiu-Yan, Xin Ya-Ping, Shi Xiu-Zhu, Xu Jian-Zhong. Effect of different size-modified expandable graphite and ammonium polyphosphate on the flame retardancy, thermal stability, physical, and mechanical properties of rigid polyurethane foam // Polymer Engineering & Science. 2019. Vol. 59. Issue 7. Pp. 1381–1394. DOI: 10.1002/pen.25123
5. Zheng Xiaorui, Wang Guojian, Xu Wei. Roles of organically-modified montmorillonite and phosphorous flame retardant during the combustion of rigid polyurethane foam // Polymer Degradation and Stability. 2014. Vol. 101. Pp. 32–39. DOI: 10.1016/j.polyimdegstab.2014.01.015
6. Haynes W.M. CRC handbook of chemistry and physics. 95ed. CRC Press, 2014. Pp. 3–516.
7. Wang Supan, Chen Haixiang, Zhang Linhe. Thermal decomposition kinetics of rigid polyurethane foam and ignition risk by a hot particle // Journal of Applied Polymer Science. 2013. Vol. 131. Issue 4. DOI: 10.1002/app.39359
8. Urban J.L. Spot ignition of natural fuels by hot metal particles : doctor of Philosophy in Engineering. Mechanical Engineering in the Graduate Division of the University of California, Berkeley, 2017. 66 p.
9. Urban J.L., Zak C.D., Song J., Fernandez-Pello C. Smoldering spot ignition of natural fuels by a hot metal particle // Proceedings of the Combustion Institute. 2017. Vol. 36. Issue 2. Pp. 3211–3218. DOI: 10.1016/j.proci.2016.09.014

10. Urban J.L., Zak C.D., Fernandez-Pello C. Spot fire ignition of natural fuels by hot aluminum particles // *Fire Technology*. 2018. DOI: 10.1007/s10694-018-0712-4
11. Wang Supan, Zhang Yu, Huang Xinyan. Ignition of EPS foam by a hot moving hollow particle: Threshold, auto-ignition, and fire point // *Combustion and Flame*. 2021. Vol. 232. P. 111524. DOI: 10.1016/j.combustflame.2021.111524
12. Glushkov D.O., Kosintsev A.G., Kuznetsov G.V., Vysokomorny V.S. Experimental research and numerical simulation of gel fuel ignition by a hot particle // *Fuel*. 2021. Vol. 291. P. 120172. DOI:10.1016/j.fuel.2021.120172
13. Glushkov D.O., Kuznetsov G.V., Strizhak P.A., Taburchinov R.I. Numerical simulation of gel fuel gas-phase ignition by a local source of limited heat content // *Acta Astronautica*. 2019. Vol. 163. Pp. 44–53. DOI: 10.1016/j.actaastro.2018.11.050
14. Glushkov D.O., Legros J.-C., Strizhak P.A., Zakharevich A.V. Experimental and numerical study of heat transfer and oxidation reaction during ignition of diesel fuel by a hot particle // *Fuel*. 2016. Vol. 175. Pp. 105–115. DOI: 10.1016/j.fuel.2016.02.042
15. Shi Xueqiang, Zhang Yutao, Chen Xiaokun, Zhang Yuanbo, Ma Qian. Characteristics of coal dust ignited by a hot particle // *Process Safety and Environmental Protection*. 2021. Vol. 153. Pp. 225–238. DOI: 10.1016/j.psep.2021.07.021
16. Clay R., Keivens K., Carmignani L., Bhattacharjee S. Ignition of solid fuels: A new approach to study the time delay // 11th U.S. National Combustion Meeting Organized by the Western States Section of the Combustion Institute, March 24–27, 2019. Pasadena, California, 2019. URL: <https://www.researchgate.net/publication/332182312>
17. Günther M., Lorenzetti A., Scharrel B. Fire phenomena of rigid polyurethane foams // *Polymers*. 2018. Vol. 10. Issue 10. P. 1166. DOI: 10.3390/polym10101166
18. Wille G., Millot F., Rifflet J.C. Thermophysical properties of containerless liquid iron up to 2500 K // *International Journal of Thermophysics*. 2002. Vol. 23. No. 5. Pp. 1197–1206. DOI: 10.1023/a:1019888119614
19. Riboux G., Gordillo J.M. Maximum drop radius and critical Weber number for splashing in the dynamical Leidenfrost regime // *Journal of Fluid Mechanics*. 2016. Vol. 803. Pp. 516–527. DOI: 10.1017/jfm.2016.496
20. Yang Jiuling, Wang Supan, Chen Haixiang. Effect of interface thermal resistance on ignition of reactive material by a hot particle // *International Journal of Heat and Mass Transfer*. 2016. Vol. 97. Pp. 146–156. DOI: 10.1016/j.ijheatmasstransfer.2016.01.070

REFERENCES

1. *Fires and Fire Safety in 2020*. D.M. Gordienko (ed.). Moscow, VNIPO, 2021. (rus).
2. Song Jiayun, Wang Supan, Chen Haixiang. Safety distance for preventing hot particle ignition of building insulation materials. *Theoretical and Applied Mechanics Letters*. 2014; 4(3):034005. DOI: 10.1063/2.1403405
3. Tang Gang, Zhou Lin, Zhang Ping, Han Zhongqiang, Chen Depeng, Liu Xiuyu et al. Effect of aluminum diethylphosphinate on flame retardant and thermal properties of rigid polyurethane foam composites. *Journal of Thermal Analysis and Calorimetry*. 2020; 140:625-636. DOI: 10.1007/s10973-019-08897-z
4. Pang Xiu-Yan, Xin Ya-Ping, Shi Xiu-Zhu, Xu Jian-Zhong. Effect of different size-modified expandable graphite and ammonium polyphosphate on the flame retardancy, thermal stability, physical, and mechanical properties of rigid polyurethane foam. *Polymer Engineering & Science*. 2019; 59(7):1381-1394. DOI: 10.1002/pen.25123
5. Zheng Xiaorui, Wang Guojian, Xu Wei. Roles of organically-modified montmorillonite and phosphorous flame retardant during the combustion of rigid polyurethane foam. *Polymer Degradation and Stability*. 2014; 101:32-39. DOI: 10.1016/j.polyimdegradstab.2014.01.015
6. Haynes W.M. *CRC handbook of chemistry and physics*. 95ed. CRC Press, 2014; 3-516.
7. Wang Supan, Chen Haixiang, Zhang Linhe. Thermal decomposition kinetics of rigid polyurethane foam and ignition risk by a hot particle. *Journal of Applied Polymer Science*. 2013; 131:4. DOI: 10.1002/app.39359
8. Urban J.L. *Spot ignition of natural fuels by hot metal particles : doctor of Philosophy in Engineering*. Mechanical Engineering in the Graduate Division of the University of California, Berkeley, 2017; 66.

9. Urban J.L., Zak C.D., Song J., Fernandez-Pello C. Smoldering spot ignition of natural fuels by a hot metal particle. *Proceedings of the Combustion Institute*. 2017; 36(2):3211-3218. DOI: 10.1016/j.proci.2016.09.014
10. Urban J.L., Zak C.D., Fernandez-Pello C. Spot fire ignition of natural fuels by hot aluminum particles. *Fire Technology*. 2018. DOI: 10.1007/s10694-018-0712-4
11. Wang Supan, Zhang Yu, Huang Xinyan. Ignition of EPS foam by a hot moving hollow particle: Threshold, auto-ignition, and fire point. *Combustion and Flame*. 2021; 232: 111524. DOI: 10.1016/j.combustflame.2021.111524
12. Glushkov D.O., Kosintsev A.G., Kuznetsov G.V., Vysokomorny V.S. Experimental research and numerical simulation of gel fuel ignition by a hot particle. *Fuel*. 2021; 291:120172. DOI:10.1016/j.fuel.2021.120172
13. Glushkov D.O., Kuznetsov G.V., Strizhak P.A., Taburchinov R.I. Numerical simulation of gel fuel gas-phase ignition by a local source of limited heat content. *Acta Astronautica*. 2019; 163:44-53. DOI: 10.1016/j.actaastro.2018.11.050
14. Glushkov D.O., Legros J.-C., Strizhak P.A., Zakharevich A.V. Experimental and numerical study of heat transfer and oxidation reaction during ignition of diesel fuel by a hot particle. *Fuel*. 2016; 175:105-115. DOI: 10.1016/j.fuel.2016.02.042
15. Shi Xueqiang, Zhang Yutao, Chen Xiaokun, Zhang Yuanbo, Ma Qian. Characteristics of coal dust ignited by a hot particle. *Process Safety and Environmental Protection*. 2021; 153:225-238. DOI: 10.1016/j.psep.2021.07.021
16. Clay R., Keivens K., Carmignani L., Bhattacharjee S. Ignition of solid fuels: A new approach to study the time delay. *11th U.S. National Combustion Meeting Organized by the Western States Section of the Combustion Institute, March 24–27, 2019. Pasadena, California, 2019*. URL: <https://www.researchgate.net/publication/332182312>
17. Günther M., Lorenzetti A., Schartel B. Fire phenomena of rigid polyurethane foams. *Polymers*. 2018; 10(10):1166. DOI: 10.3390/polym10101166
18. Wille G., Millot F., Rifflet J.C. Thermophysical properties of containerless liquid iron up to 2500 K. *International Journal of Thermophysics*. 2002; 23(5):1197-1206. DOI: 10.1023/a:1019888119614
19. Riboux G., Gordillo J.M. Maximum drop radius and critical Weber number for splashing in the dynamical Leidenfrost regime. *Journal of Fluid Mechanics*. 2016; 803:516-527. DOI: 10.1017/jfm.2016.496
20. Yang Jiuling, Wang Supan, Chen Haixiang. Effect of interface thermal resistance on ignition of reactive material by a hot particle. *International Journal of Heat and Mass Transfer*. 2016; 97:146-156. DOI: 10.1016/j.ijheatmasstransfer.2016.01.070

Поступила 17.12.2021, после доработки 10.01.2022; принята к публикации 17.01.2022
Received December 17, 2021; Received in revised form January 10, 2022; Accepted January 17, 2022

Информация об авторе

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

Information about the author

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

ПОЖАРОВЗРЫВБЕЗОПАСНОСТЬ/FIRE AND EXPLOSION SAFETY. 2022. Т. 31. № 1. С. 21–39
 POZHAROVZRYVOBEZOPASNOST/FIRE AND EXPLOSION SAFETY. 2022; 31(1):21-39

НАУЧНАЯ СТАТЬЯ/RESEARCH PAPER

УДК 614.849

<https://doi.org/10.22227/0869-7493.2022.31.01.21-39>

Теплотехнический анализ результатов огневых испытаний под нагрузкой чугунных тюбингов обделок тоннелей метрополитена, обеспечение их рациональной огнезащиты и заданной огнестойкости

Анатолий Никитович Гаращенко^{1✉}, Андрей Игоревич Данилов¹,
 Сергей Порфирьевич Антонов², Светлана Васильевна Марченкова³,
 Владимир Валерьевич Павлов⁴

¹ Центр исследований опасных факторов пожаров, г. Санкт-Петербург, Россия

² ПРОЗАСК, г. Москва, Россия

³ Государственный университет по землеустройству, г. Москва, Россия

⁴ 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. Рассмотрена проблема обеспечения фактического предела огнестойкости чугунных тюбингов обделки тоннелей метрополитена. Ее актуальность обусловлена тем, что до настоящего времени в нашей стране и за рубежом не проводились огневые испытания таких конструкций и, соответственно, теплотехнический анализ их результатов, что необходимо для гарантирования их работоспособности.

Цель и задача. Анализ результатов двух огневых экспериментов: испытание чугунного тюбинга без огнезащиты, и тюбинга, защищенного огнезащитной плитой. Выбор и использование рациональной методики для проведения теплотехнического анализа.

Методы. Оценивалась огнестойкость натуральных образцов тюбингов по стандартизованной методике в ходе испытаний в огневой печи под нагрузкой с проведением термометрических измерений, результаты которых использовались в ходе теплотехнического анализа. Он проводился с использованием методик и программ численных расчетов нестационарных температурных полей в конструкциях с огнезащитой в одно- и двумерной постановке.

Результаты. Установлено, что предел огнестойкости чугунного тюбинга тоннельной обделки марки 5,6-25-НУ, испытанного без огнезащиты под воздействием постоянной статической нагрузки (150 кН), составляет 54 мин, что соответствует классификации R 45, а тюбинга с огнезащитой плитами «ПРОЗАСК Файерпанель» толщиной 25 мм — не менее 121 мин (R 120). Расчеты позволили дать прогноз, насколько изменится уровень огнестойкости, если учитывать отличие условий испытаний и эксплуатации тюбингов. Представлены результаты расчетов для различных вариантов огнезащиты, продемонстрирована высокая эффективность огнезащиты плитами «ПРОЗАСК Файерпанель» и возможность обеспечения с ее помощью требуемых пределов огнестойкости чугунных тюбингов. Показана возможность прогнозирования их огнестойкости при режимах воздействия, отличающихся от стандартного температурного режима.

Выводы. Теплотехнический анализ результатов двух огневых экспериментов, впервые проведенных для оценки огнестойкости чугунных тюбингов обделки тоннелей, позволил получить важную информацию, необходимую для обеспечения огнезащиты и заданной огнестойкости указанных ответственных конструкций метрополитена и дальнейшего развития данного направления экспериментальных и теоретических исследований. Продемонстрирована эффективность теплотехнических расчетов как инструмента для оценки параметров огнезащиты и огнестойкости тюбингов и возможность сокращения с их помощью количества дорогостоящих огневых испытаний.

Ключевые слова: предел огнестойкости; теплотехнические расчеты; температурный режим пожара; статическая нагрузка; граничное условие; теплофизические характеристики

Для цитирования: Гаращенко А.Н., Данилов А.И., 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. Т. 31. № 1. С. 21–39, DOI: 10.18322/PVB.2022.31.01.21-39

✉ Гаращенко Анатолий Никитович, e-mail: a.n.gar@mail.ru

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

Anatoliy N. Garashchenko^{1✉}, Andrey I. Danilov¹, Sergey P. Antonov²,
Svetlana V. Marchenkova³, Vladimir V. Pavlov⁴

¹ Research Center of Hazardous Fire Factors, Saint-Petersburg, Russian Federation

² PROZASK, Moscow, Russian Federation

³ State University of Land Use Planning, Moscow, Russian Federation

⁴ 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 article addresses the fireproofing limit of the cast-iron tubing that lines subway tunnels. These structures have been fire tested neither in our country, nor abroad, and therefore, no fire test results have been analyzed, although this analysis is necessary to guarantee structural performance.

Purpose and objective. The purpose of the study is to analyze the results of two fire experiments, including the testing of the cast iron tubing without fire proofing, and the testing of the tubing protected by a fireproof plate. The objective of the study is to choose and use a rational thermal analysis methodology.

Methods. A standardized methodology was applied to test the fire resistance of loaded full-scale tubing specimens in a fire furnace, where thermocouple measurements of tested specimens were taken. The thermal analysis of these measurement results was conducted, using the methods and software for the numerical calculation of non-stationary temperature fields inside fireproof structures in one- and two-dimensional settings.

Results. It has been established that the fire resistance limit of the 5.6-25-NU cast-iron tubing tested under constant static loading (150 kN) without any fire protection is 54 minutes, which corresponds to classification R 45, while the fire resistance limit of the same tubing, fireproofed by PROSASK fire panel plates, that are 25 mm thick, is, at least, 121 min (R 120). Calculations allow to prognosticate a change in the fire resistance, if account is taken of the difference between the test environment and the one of the tubing when in operation. The authors present the results of calculations for various fire protection options and show that the fire protection and fire resistance limits of the cast-iron tubing are high, if PROSASK fire plates are used. The authors also demonstrate the projectability of the fire resistance values, if the modes of exposure differ from the standard temperature mode.

Conclusions. The thermal analysis of the results of two fire experiments, conducted to evaluate the fire resistance of the cast-iron tubing as the tunnel lining allows to obtain the information that is essential for the fire protection and pre-set fire resistance of critical subway structures as well as the further development of this area of experimental and theoretical research. The authors demonstrate the efficiency of thermal calculations as an instrument for the evaluation of fire protection parameters/fire resistance of tubing and the reduction in the number of costly fire tests.

Keywords: fire resistance limits; engineering calculations; temperature regime of fire; static load; boundary condition; thermophysical characteristics

For citation: Garashchenko A.N., Danilov A.I., Antonov S.P., Marchenkova S.V., Pavlov V.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(1):21-39, DOI: 10.18322/PVB.2022.31.01.21-39 (rus)

✉ Anatoliy Nikitovich Garashchenko, e-mail: a.n.gar@mail.ru

Введение

Обделки из чугуновых тубингов применяются для строительства в сложных гидрогеологических условиях тоннелей метрополитена, а также для строительства стволов вентиляционных шахт, наклонных ходов, сбоек, коммуникационных и транспортных тоннелей. Чугунные тубинги относятся к основным несущим конструкциям перечисленных тоннельных сооружений, работоспособность которых должна быть обеспечена в условиях эксплуатации подземных

сооружений. В их числе требования по обеспечению важнейшего показателя пожарной безопасности — предела огнестойкости. К обделкам тоннелей метрополитена предъявляются требования по пределу огнестойкости 90 мин (перегонные тоннели) и 60 мин (эскалаторы).

Следует отметить, что в строительной отрасли как у нас, так и за рубежом доля несущих конструкций из чугуна относительно невелика по сравнению с конструкциями из стали и железобетона. Отчасти

по этой причине исследования огнестойкости и огнезащиты несущих конструкций из чугуна в требуемом объеме не проводились. Как следует из нормативных документов, определение огнестойкости любых несущих конструкций должно проводиться в ходе огневых экспериментов при действии эксплуатационных нагрузок. Подобным образом в нашей стране и за рубежом испытываются несущие конструкции из стали (колонны, балки и пр.), железобетона (колонны, балки, плиты перекрытий и пр.), а также железобетонные тубинги обделки тоннелей [1–9]. Так, компания EFECTIS, один из ведущих европейских лидеров в области пожарной безопасности, проводит тесты или с сегментами тоннельной обделки, или с железобетонными изделиями в виде стен, или перекрытий размером, минимум, $1,45 \times 1,45$ м, при этом тесты горизонтальных конструкций распространяются также и на вертикальные конструкции, а тесты вертикальных конструкций — только для вертикальных [9]. Практикуются также расчеты огнестойкости, причем большее внимание уделяется статическим расчетам по сравнению с теплотехническими, как, например, в расчетах ожидаемой огнестойкости блоков тоннельной обделки высокоскоростной железной дороги Милан – Генуя [8], где с помощью программного обеспечения FLAC 7.0 моделировались поля напряжений в обделке тоннелей с учетом взаимодействия с различными типами грунтов. Что же касается чугунных тубингов обделки различных тоннелей, то, по имеющейся информации, огневые эксперименты для них при нагрузках и даже без них ранее не проводились ни у нас, ни за рубежом.

Известно, что традиция и опыт [10], а также соответствующие нормативные документы (см. СП 122.13330.2012 «Тоннели железнодорожные и автодорожные. Актуализированная редакция СНиП 32-04-97»), регламентирующие проектирование, изготовление и эксплуатацию подобных тубингов из чугуна, характерны исключительно для нашей страны. Однако до настоящего времени сведения по огнестойкости тубингов и даже прочих несущих конструкций из чугуна крайне ограничены и явно не достаточны. Информация по этой тематике, обнаруженная в зарубежных источниках, не касается тубингов и ограничивается публикациями [11–14]. В статье [11] отмечается малая изученность поведения конструкционного чугуна при высокотемпературном нагреве. Публикации [12, 13] полезны в части оценки предполагаемого уровня критической температуры, необходимой для оценки огнестойкости несущих конструкций из чугуна. В [14] представлены результаты огневых экспериментов для чугунных колонн, а также численного моделирования их поведения и огнестойкости в ходе теплотехнических и статических расчетов.

Из отечественных публикаций можно отметить статьи [15, 16]. В них представлены результаты теплотехнических расчетов, проведенных для конструкций чугунных тоннельных обделок метрополитена при отсутствии, а также при наличии одного из вариантов их огнезащиты. Указан также предполагаемый уровень критической для чугуна температуры. Результаты расчетов, представленных в [15, 16], в основном, свидетельствовали о недостаточном уровне ожидаемых пределов огнестойкости для типовых чугунных тубингов. Но до последнего времени (даже при наличии подобной информации) задача по обеспечению их огнезащиты и заданной огнестойкости, а, главное, по экспериментальной проверке принятых технических решений не решалась и даже не ставилась. Это предопределило необходимость организации первых огневых экспериментов чугунных тубингов для оценки их огнестойкости. Один эксперимент проводился при отсутствии огнезащиты, а другой — при использовании конструктивной огнезащиты плитами «ПРОЗАСК Файерпанель».

Вариант конструктивной огнезащиты с использованием этих плит представляется наиболее перспективным. Практика его применения для различных конструкций на многочисленных ответственных строительных объектах показала, что он обеспечивает достаточно высокую огнезащитную эффективность, эксплуатационную стойкость (так как изготовлен на цементном связующем), технологичность монтажа с возможностью быстрого снятия и установки плит при мониторинге состояния обделки, эстетическую привлекательность и имеет прочие положительные качества. Особо следует отметить, что для плит «ПРОЗАСК Файерпанель» (в отличие от других средств огнезащиты) имеется наибольший объем огневых экспериментов под нагрузкой, проведенных для различных конструкций из железобетона и стали. Испытания под нагрузкой предусмотрены нормативными документами, тем не менее, для большинства других средств огнезащиты такие испытания проводились и проводятся в явно недостаточном объеме или не проводились вообще. Как и требуется, огневые испытания конструкций с огнезащитой плитами проводились с использованием специальных элементов крепления плит, разработанными для основных видов защищаемых конструкций. Именно совместно с ними должна подтверждаться работоспособность и эффективность конструктивной огнезащиты.

Сложность и высокая стоимость подготовки и проведения огневых испытаний чугунных тубингов (тем более под нагрузкой) предопределили необходимость проведения тщательного анализа первых экспериментальных результатов с привлечением теплотехнических расчетов по надежным методикам.

Предполагается, что такие испытания и их всесторонний анализ могут стать основой для продолжения работ по этой важной тематике с последующей регламентацией порядка их проведения и практического использования получаемых результатов при обеспечении огнезащиты и заданной огнестойкости чугунных тубингов для объектов метрополитена.

Следует отметить, что теплотехническим расчетам до настоящего времени уделяется недостаточное внимание, хотя возможность их проведения при проектировании и анализе результатов огневых испытаний предусмотрена нормативными документами, в частности статьей 87 п. 10 Федерального закона от 22.07.2008 г. № 123-ФЗ «Технический регламент о требованиях пожарной безопасности». Однако во исполнение этого закона на сегодняшний день нормативными документами по пожарной безопасности не определены расчетно-аналитические методы для расчетов огнестойкости чугунных конструкций. Это затрудняет оценку и обоснованное обеспечение требуемых пределов огнестойкости, а также назначение и обоснование эффективности рациональной огнезащиты. В частности, без таких расчетов затруднены анализ и правильная интерпретация результатов испытаний в огневых печах. В то же время проведение расчетов крайне желательно и востребовано, учитывая значительные затраты времени и средств на проведение даже ограниченно количества огневых испытаний и невозможность проведения таких испытаний для различных вариантов исполнения как самих конструкций, так и их огнезащиты.

Имеющиеся коммерческие (в основном зарубежные) программные комплексы плохо приспособлены к решению задач по проведению оперативного теплотехнического анализа. Они малодоступны из-за их высокой стоимости и обладают относительно низкой производительностью. Оптимальным вариантом в данной ситуации является использование относительно несложных и производительных отечественных методик и программ с доказанной возможностью их применения. При проведении анализа нами использовались методики и программы, апробированные в ходе проектных расчетов для различных средств огнезащиты строительных конструкций на многочисленных объектах.

Изложенное обосновывает правомерность цели и задач исследований, включающих прогнозирование огнестойкости рассматриваемых ответственных конструкций на основе анализа результатов двух огневых экспериментов, впервые проведенных как для чугунного тубинга без огнезащиты, так и при использовании огнезащитных плит «ПРОЗАСК Файерпанель». Для проведения такого анализа выбирались надежные методики теплотехнических расчетов.

Выбор методик, компьютерных программ и исходных данных для теплотехнических расчетов

Теплотехнические расчеты огнестойкости могут использоваться в ходе анализа результатов испытаний на огнестойкость различных строительных конструкций с огнезащитой и без нее, а также (наряду со статическими расчетами) при проектировании и проведении экспертизы проектных решений. Следует отметить недостаточный уровень имеющихся методик и рекомендаций по проведению теплотехнических расчетов строительных конструкций, что не соответствует современным требованиям и возможностям. Особенно это характерно для конструкций с огнезащитой, где такие рекомендации недостаточно четкие и обоснованные, и касается это не только применяемых методик, но и данных по теплофизическим и прочим характеристикам материалов, необходимых для таких расчетов.

Для металлоконструкций (в данном случае для чугунных тубингов обделки тоннелей) рассматривалась возможность использования стандарта СТО АРСС 11251254.001-018-03, подготовленного Ассоциацией развития стального строительства (АРСС) [17]. Он содержит статическую и теплотехническую части методики оценки огнестойкости конструкций и применяется, в том числе, и для проектирования огнезащиты (см., например, [18, 19]. Статический расчет позволяет оценить значения критической температуры конструкций. Однако в [17] рассматривается только их относительно простая форма и простые схемы нагружения. Что же касается теплотехнической части, то упомянутую там методику следует признать устаревшей, поскольку во время ее разработки и публикации [20] уровень методического-программного обеспечения был более низким, чем в настоящее время. Требуется использование более совершенных методик и программ теплотехнических расчетов огнестойкости металлоконструкций, чем методика, рекомендуемая в [17–20].

Точность расчетов (в том числе и по методике, предлагаемой для конструкций из стали с огнезащитой в виде облицовок или плит [17–19]) в значительной степени определяется задаваемыми теплофизическими характеристиками материалов (ТФХ). Однако их величины для огнезащиты часто не известны, или по ним имеются разночтения. В опубликованных работах (например, в [18, 19]) не упоминаются значения используемых ТФХ. Ощущается явный недостаток информации по уровню и зависимостям таких характеристик от температуры. Особенно это актуально для плитных огнезащитных материалов и огнезащитных штукатурок, которые, как правило, являются влагосодержащими. Достоверность и точность определения температурных

полей в конструкциях с такой огнезащитой, а также оценки их огнестойкости в значительной степени зависит от квалификации проводящих такие расчеты специалистов. Зависит также от объема имеющихся в их распоряжении результатов огневых испытаний опытных образцов конструкций, а также данных по ТФХ материалов.

В то же время практика показала, что во многих случаях не обязательно применять сложные и дорогостоящие зарубежные или отечественные программные комплексы. Понимание процессов тепло- и массопереноса в конструкциях при наличии и отсутствии огнезащиты и обоснованный выбор величин ТФХ позволяет использовать преимущественно относительно несложные отечественные методики и программы расчетов, которые, в то же время расширяют возможности численного моделирования и обеспечивают получение значительно большего объема важной для практики информации. Они могут применяться и при анализе результатов огневых экспериментов. Поскольку в настоящее время не существует общепринятых (и узаконенных) методик расчетов огнезащиты из влагосодержащих материалов, которые учитывали бы сложные физико-химические процессы, происходящие в них при нагреве, необходимо применять более простые и доступные для практики методики и программы расчетов теплопередачи в конструкциях.

Вышеизложенное свидетельствует о целесообразности использования приведенной ниже относительно простой исходной системы уравнений, описывающей нестационарный процесс теплопередачи для многослойной конструкции в одномерной постановке, представленной в координатах OX , отсчитываемых от ее обогреваемой поверхности:

- уравнение нестационарной теплопроводности:

$$\rho c_{\Sigma} \frac{\partial T}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x} \left(\lambda_{\Sigma} \frac{\partial T}{\partial x} \right); \quad (1)$$

- граничное условие на обогреваемой поверхности конструкции:

$$\lambda_{\Sigma} \frac{\partial T}{\partial x} = \alpha_n (T_{\text{ср}} - T_n) + A \sigma (T_{\text{ср}}^4 - T_n^4),$$

$$A = 1 / \left(\frac{1}{\varepsilon_{\text{ср}}} + \frac{1}{\varepsilon_n} - 1 \right); \quad (2)$$

- граничное условие на необогреваемой (наружной) поверхности:

$$-\lambda_{\Sigma} \frac{\partial T}{\partial x} = \alpha_n (T_n - T_0) - \varepsilon_n \sigma T_n^4; \quad (3)$$

- начальное условие:

$$T(x, 0) = T_0; \quad (4)$$

- условия на границе между слоями:

$$\lambda_{\Sigma} \frac{\partial T}{\partial x} \Big|_{x=x_{\text{гп}}-0} = \lambda_{\Sigma} \frac{\partial T}{\partial x} \Big|_{x=x_{\text{гп}}+0},$$

$$T \Big|_{x=x_{\text{гп}}-0} = T \Big|_{x=x_{\text{гп}}+0}. \quad (5)$$

В двумерной постановке уравнение нестационарной теплопроводности в декартовых координатах $OX-OY$ имеет вид (при соответствующем преобразовании краевых условий (2)–(4)):

$$\rho c_{\Sigma} \frac{\partial T}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x} \lambda_{\Sigma} \left(\frac{\partial T}{\partial x} + \frac{\partial T}{\partial y} \right). \quad (6)$$

Обозначения: T — температура; t — время; x, y — продольная и поперечная координата; ρ — плотность; λ_{Σ} — эффективный коэффициент теплопроводности; c_{Σ} — эффективная удельная теплоемкость; α — коэффициент конвективного теплообмена; ε — степень черноты; A — функция радиационных параметров; T_0 — начальная температура и температура газовой среды у необогреваемой (наружной) поверхности.

Индексы: n — нагреваемая поверхность конструкции; n — необогреваемая (наружная) поверхность конструкции; ср — высокотемпературная газовая среда; гп — границы между слоями конструкции.

При расчетах принимались следующие исходные параметры, характерные для условий огневого воздействия (испытаний) при стандартном температурном режиме:

$$T_{\text{ср}} = T_0 + 345 \log(8t + 1);$$

$$\alpha_n = 29 \text{ Вт/м}^2 \cdot \text{°C};$$

$$\varepsilon_n = 0,85;$$

$$\alpha_n = 8 \text{ Вт/м}^2 \cdot \text{°C}.$$

Как известно, аналитические решения такой задачи невозможны, а точность используемых в некоторых случаях приближенных расчетных зависимостей не доказана, в связи с чем в настоящее время их применение нецелесообразно. Тем более, что численная реализация представленной системы уравнений методом конечных разностей или методом конечных элементов не является проблемой. Существуют различные компьютерные программы, разработанные в результате такой численной реализации, которые используются в том числе и для теплотехнических расчетов с целью расчетов температурных полей и оценки огнестойкости строительных конструкций, в частности, из металла или железобетона при наличии и отсутствии огнезащиты. Традиционно сложилось так, что при численной реализации исходных систем уравнений и при разработке компьютерных программ расчетов огнестойкости более часто использовался метод конечных элементов. Это связано с тем, что программы статических расчетов, как правило, основаны именно на методе конечных элементов, что особенно оправдано для конструкций

сложной конфигурации. Оправданным является такой подход и при совместном решении теплотехнической и статической задач. По такому принципу построено большинство современных (преимущественно зарубежных и относительно дорогостоящих) программных комплексов, нашедших применение при оценках и обеспечении огнестойкости строительных конструкций.

Однако во многих важных для практики случаях можно ограничиться проведением только теплотехнических расчетов и использовать их результаты при определении толщин огнезащиты и оценке огнестойкости конструкций. Например, это применяется в случаях, когда для стальных несущих элементов конструкций известны значения критической температуры, которые были заранее определены при решении статической задачи с учетом структуры конструкций, свойств материалов, действующих нагрузок и пр. Но в этом случае использование конечно-элементных теплотехнических методик и программ не всегда рационально. Кроме ограниченной доступности из-за дороговизны таких программных комплексов, это связано и с трудоемким процессом подготовки «сетки» конечных элементов, а также с относительно большим временем численного счета для каждого конкретного варианта.

Удачной альтернативой для численной реализации одномерных и двумерных систем уравнений типа (1)–(6), а также гораздо более сложных математических моделей является метод конечных разностей. Этот метод широко используется в различных отраслях техники (в частности, в ракетно-космической). Удалось адаптировать его и для решения теплотехнических задач обеспечения огнезащиты и огнестойкости строительных конструкций. При создании разностного алгоритма компьютерной программы, применяемой в ходе настоящего теплотехнического анализа, использован метод прогонки по неявной четырехточечной схеме «зонт», обеспечивающий высокий порядок аппроксимации разностного алгоритма. При расчетах в одномерной постановке использована одна из созданных по этому принципу компьютерных программ серии «Огнезащита» [21], а именно «Огнезащита. Версия ВУ.2», на которую в свое время получены сертификаты соответствия Росстандарта (РОСС RU.СП05. С00036 от 15.07.2001 г. и РОСС RU.СП05. Н00261 от 29.01.2008 г.).

В данном случае моделируется одномерная теплопередача в многослойной конструкции в «якобы неизменяющемся» материале с эффективными ТФХ. Поэтому обнуляется целый ряд параметров, предусмотренных в данной программе и позволяющих учитывать физико-химические процессы и процессы массопереноса, происходящие в материале при нагреве. Учитывается только изменение от температу-

ры теплофизических характеристик материалов каждого слоя конструкции. Преимуществом такой методики и программы является возможность проведения значительного объема расчетов в одномерной постановке за ограниченный период времени.

Для моделирования теплопередачи в двумерной постановке использовалась методика и компьютерная программа «Огнезащита. Версия 2Т» [21], на которую получены в свое время сертификаты соответствия Росстандарта (РОСС RU. СП05.С00037 от 15.07.2001 г. и РОСС RU.СП05. Н00262 от 29.01.2008 г.). Ее использование может быть востребованным для расчетов металлоконструкций (в данном случае чугунных трубных обделок с огнезащитой и без нее). Естественно, могут применяться и другие программные комплексы, тем более такие, использование которых позволяет, наряду с расчетами температурных полей, определять эпюры напряжений, возникающих в конструкциях при действии заданных нагрузок.

Следует отметить еще одну особенность проводимых расчетов. Если в ходе экспериментов удавалось измерить температуру на поверхности конструкции (под огнезащитой), то эту важную информацию можно использовать для теплотехнического анализа. В этом случае необходимо задавать граничное условие 1-го рода в виде зарегистрированного в эксперименте изменения во времени температуры на границе огнезащита – опытный образец. Такой подход позволяет абстрагироваться от огнезащиты (здесь из плит) и, соответственно, от сложных процессов тепло- и массопереноса, происходящих в такой огнезащите, а также от малоизученных на данный момент характеристик самих огнезащитных материалов. Граничное условие 1-го рода задается в данном случае вместо обычно используемого условия (2) (лучисто-конвективный нагрев), которое зависит от температуры газовой среды, изменяющейся по стандартному или иному режиму пожара, и от соответствующего набора сопутствующих параметров.

Следует обратить внимание и на то, что регистрируемые при экспериментах и используемые при расчетах температурные кривые учитывают не только сложные физико-химические процессы в огнезащите и ее характеристики, но и зависят от сохранения сплошности и толщины огнезащиты, т.е. зависят от возможного растрескивания, разрушения, образования щелей и зазоров и т.д. Эти факторы могут работать только в одном направлении, т.е. привести к существенному увеличению уровня температуры в контролируемой зоне по сравнению со случаем теплопередачи в огнезащите со стабильной геометрией и структурой.

С использованием упомянутых методик и программ расчетов, а также указанных выше параметров проводились теплотехнические расчеты для анализа

результатов двух впервые проведенных огневых испытаний под нагрузкой чугунных тюбингов обделки тоннелей. До настоящего времени необходимость проведения таких испытаний игнорировалась, и они не проводились даже без нагрузок на конструкции. В отличие от тюбингов из чугуна, испытания под нагрузкой железобетонных блоков обделки тоннелей (преимущественно автодорожных и метрополитена) в последнее время проводятся регулярно.

Сложившаяся ситуация в значительной степени связана с тем, что производителей чугунных тюбингов почему-то не обязывают подтверждать показатель их огнестойкости, хотя он относится к числу важнейших характеристик, обеспечивающих их работоспособность в процессе эксплуатации. Явно недостаточное внимание к данной проблеме проявляют также проектные организации и, собственно, сами заказчики данной продукции. Косвенным подтверждением сказанного являются сложности, с которыми пришлось столкнуться в ходе поиска и приобретения образцов для огневых испытаний. Данная ситуация неприемлема и требует разрешения, для чего и были инициированы и организованы первые испытания чугунных тюбингов обделки тоннелей с перспективой совершенствования методики их проведения и обеспечения, в дальнейшем, выхода на требуемый объем огневых экспериментов и должный уровень анализа их результатов.

Результаты огневых экспериментов и их анализ

Первый огневой эксперимент был проведен в ИЛ НИЦПБ ФГБУ ВНИИПО МЧС России. Его результаты представлены в «Отчете № 957-3.2-КИ-2020 от 25.12.2020 г. об испытаниях тюбинга обделки мар-

ки 5,6-25-НУ». Испытания опытных образцов проводились с целью определения предела их огнестойкости по ГОСТ 30247.0-94 и ГОСТ 30247.1-94. Образцы испытывались без огнезащиты, а также без теплоизоляции со стороны необогреваемой поверхности. Опытные образцы, пролет которых составлял 1540 мм, устанавливались на огневую камеру испытательной установки и подвергались одностороннему тепловому воздействию снизу по стандартному температурному режиму. Испытания проводились под действием постоянной вертикальной статической нагрузки 150 кН. Следует отметить, что при эксплуатации тюбинги могут подвергаться более высоким, более сложным и по другому распределенным нагрузкам. Однако на момент проведения данных тестов на базе ВНИИПО не было адаптированных к чугунным тюбингам стендов для одновременного приложения разнонаправленных нагрузок на чугунные тюбинги. В ходе испытаний предварительно определялось расчетное значение предельного прогиба в середине пролета исследуемого образца. Оно составило 77 мм, а средняя скорость нарастания деформации (до момента начала лавинообразного нарастания прогиба) — 0,79 мм/мин.

Предел огнестойкости опытных образцов был достигнут на 53-й и 55-й минутах огневого воздействия вследствие потери ими несущей способности (R), в результате последовательного достижения скорости нарастания деформации более 0,13 см/мин и предельного прогиба более 77 мм. Образец после эксперимента показан на рис. 1. Кроме того, проводились измерения температуры наружной (необогреваемой) поверхности. Установлено, что предел огнестойкости исследуемого чугунного тюбинга составил 54 мин, что соответствует классификации R 45.



a



b

Рис. 1. Внешний вид наружной поверхности *a* и зоны разрушения *b* опытного образца

Fig. 1. The external appearance of the exterior surface *a* and the failure area *b* of the tested specimen

Результаты второго огневого эксперимента, проведенного во ВНИИПО, представлены в «Отчете № 971-3.2-КИ-2021 от 12.02.2021 г. об испытаниях тубинга обделки марки 5,6-25-НУ с огнезащитой плитами «ПРОЗАСК Файерпанель». На опытные образцы производился монтаж конструктивной огнезащиты толщиной 25 мм (два слоя плит толщиной по 12,5 мм). На рис. 2 показана установка профилей для монтажа плит. Выбиралась такая схема установки каркаса и такая конструкция легких стальных тонкостенных конструкций, которая позволяла легко монтировать и демонтировать их к крепежным эле-

ментам в технологических отверстиях с внутренней стороны тубинга. На рис. 3 показан образец, на левой половине которого смонтирован один, а на правой — два слоя огнезащитных плит. Несмотря на кажущуюся сложность системы, плиты монтируются к легко устанавливаемому каркасу с помощью саморезов (также прошедших серию огневых испытаний). Это позволяет очень комфортно обслуживать и саму огнезащитную систему, и тубинги при эксплуатации, обеспечивая ее ремонтпригодность. Внешний вид опытного образца тубинга после монтажа огнезащиты представлен на рис. 4, а.

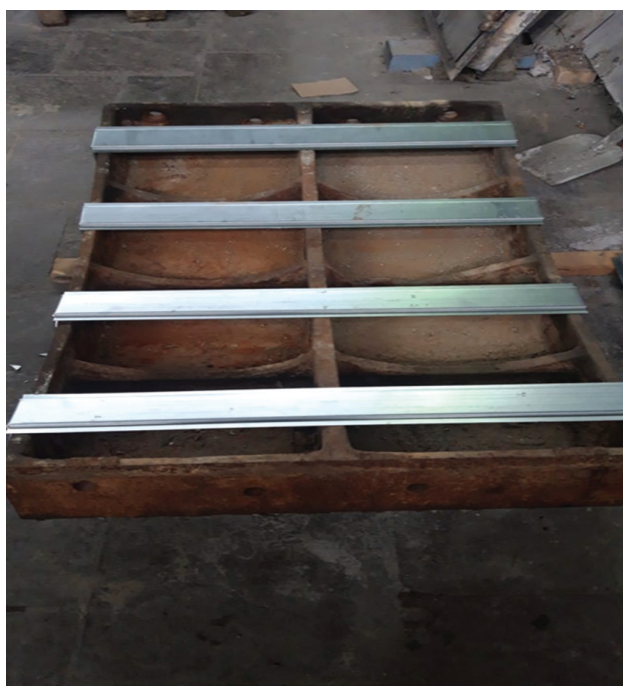


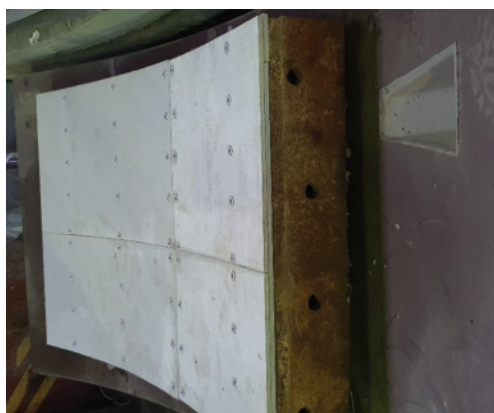
Рис. 2. Установка профилей каркаса для монтажа огнезащитных плит

Fig. 2. The installation of frame profiles needed to fix fire protection plates



Рис. 3. Огнезащитные плиты смонтированы на чугунном тубинге

Fig. 3. Fire protection plates fixed to the cast iron tubing



a



b

Рис. 4. Опытный образец перед испытанием

Fig. 4. The specimen before the onset of testing



Рис. 5. Образец с огнезащитой после испытания (вид с обогреваемой стороны)

Fig. 5. The specimen, that has fire protection, after testing (if viewed from the heated side)

Схема испытаний и уровень нагрузок соответствовали первому эксперименту. Также измерялась температура наружной (необогреваемой) поверхности тьюбинга, на которой в данном случае размещался слой теплоизоляции из минераловатных плит толщиной порядка 150 мм, что видно на рис. 4, *b*. Испытания показали, что предел огнестойкости образцов по потере несущей способности конструкции за время огневого воздействия продолжительностью 121 мин не был достигнут. Прогиб составил 31 и 33 мм для 1 и 2-го образца соответственно, что значительно ниже предельного значения (77 мм). Таким образом, предел огнестойкости исследуемого тьюбинга с огнезащитой плитами «ПРОЗАСК Файерпанель» толщиной 25 мм составляет не менее 121 мин, что соответствует классификации R 120. Внешний вид опытного образца после испытания представлен на рис. 5. Видно, что на отдельных участках отсутствует или отслоился первый (наружный) слой огнезащитной плиты. Для объективности следует отметить, что плиты после окончания испытаний еще длительное время подвергались оставшемуся тепловому воздействию огневой печи, а испытательная установка не позволяла осуществлять визуальный контроль за состоянием плит в ходе огневого воздействия.

Ранее огневые эксперименты для чугунных тьюбингов не проводились, для оценки ожидаемой огнестойкости приходилось ограничиваться расчетами. Однако и их объем (можно назвать публикации [15, 16]) был явно недостаточен. Проведение первых огневых испытаний чугунных тьюбингов позволило провести теплотехнический анализ их результатов с использованием данных измерения температуры на их необогреваемой поверхности. Осредненные температурные кривые для образцов тьюбинга без

огнезащиты представлены на рис. 6, а образцов с конструктивной огнезащитой — на рис. 9.

При расчетах температурных полей задавались теплофизические характеристики серого чугуна, заимствованные в [15, 16]: $\rho = 7100 \text{ кг/м}^3$; $\lambda = 52 \text{ Вт/(м·К)}$; $c = 502 \text{ Дж/(кг·К)}$ (0°C), 523 (160°C), 553 (260°C), 586 (360°C), 620 Дж/(кг·К) (510°C). Но в отличие от [15, 16] использовалось значение степени черноты $\epsilon_n = 0,96$ (по рекомендации [22, 23] для шероховатого окисленного чугуна). Важность этого параметра в данном случае обусловлена тем, что на характер изменения и уровень температуры конструкции значительно влияет теплосъем с его наружной поверхности за счет излучения в окружающее пространство. Как следует из граничного условия (3), тепловой поток излучения зависит от уровня нагрева конструкции и степени черноты ее поверхности. Расчеты проводились для приведенной толщины металла испытываемого тьюбинга, равной 34,7 мм. Это значение находится в диапазоне значений приведенной толщины (от 31,7 до 35,9 мм), который обозначен в [11] в качестве характерного для тьюбингов из серого чугуна, используемых при строительстве тоннелей метрополитена.

Результаты расчетов прогрева рассматриваемого тьюбинга в условиях первого эксперимента представлены на рис. 6. Характер изменения расчетной зави-

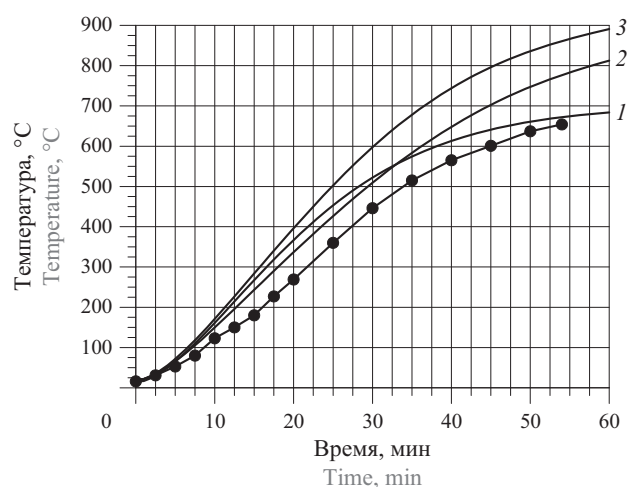


Рис. 6. Зависимости от времени температуры наружной (необогреваемой) поверхности чугунного тьюбинга без огнезащиты при стандартном температурном воздействии для незащищенной (открытой) наружной поверхности 1 при ее контактировании с грунтом 2 и в случае теплоизоляции минераловатными плитами 3; —•••••— измерения температуры в первом огневом эксперименте

Fig. 6. Dependences between the exposure time and the temperature of the external (unheated) surface of the cast-iron tubing (without fire protection) in the case of the standard temperature exposure of 1 an unprotected (open) external surface, 2 if the tubing is in contact with soil, and 3 if the tubing is insulated by mineral wool slabs; —•••••— temperature measurements in the first fire experiment

симости (1) соответствует экспериментальной, при этом расчетные значения температуры (что важно) не ниже, чем при испытаниях. К тому же они практически совпадают в завершающий (наиболее интересующий нас) период испытания. Отмеченное отличие свидетельствует о необходимости получения в дальнейшем более точной информации по температурным измерениям и ТФХ чугуна. Однако уже имеющиеся результаты представляют значительный интерес и могут использоваться для практики.

Не вызывает сомнений, что этот эксперимент продемонстрировал, каким является уровень критической температуры для рассматриваемого типа конструкции тьюбинга и при реализованном уровне и способе приложения нагрузок. Установлено, что предел огнестойкости тьюбинга 5,6-25-НУ, испытанного под воздействием постоянной статической нагрузки, равной 150 кН, составляет 54 мин. При этом зафиксирован рост температуры на его наружной поверхности до 654 °С к моменту нарушения целостности опытного образца. В данном случае это демонстрирует уровень критической температуры при данном приложении нагрузки. Следует отметить, что это несколько заниженное значение, и последующие огневые испытания могли бы дать более точные данные по критическим температурам для испытаний с одновременным приложением вертикальных и горизонтальных нагрузок. Как показали расчеты, имеется перепад температур. На нагреваемой поверхности при указанной приведенной толщине металла (34,7 мм) температура должна быть приблизительно на 14 градусов выше. Перепад, естественно, увеличивается для более массивных конструкций. Например, для приведенной толщины металла 50 мм он составляет 23 градуса.

Наличие ребер является дополнительным источником неравномерности температуры. Для соответствующих оценок использовалась упомянутая выше методика и программа в двумерной постановке. В результате расчетов поля температур для тьюбинга с толщиной спинки и центрального ребра, равной 32 мм, и высотой ребра 168 мм определено, что для 60-й минуты воздействия в условиях первого огневого эксперимента прогрев кончика ребра мог составить порядка 760 °С, а перепад температуры его по высоте более 70 °С. Отмечается также отличие температуры участков спинки тьюбинга на удалении от ребер от температуры в их основании. Неравномерность прогрева зависит от геометрии конструкции, условий нагрева на нагреваемых поверхностях и условий теплоотдачи с наружной (необогреваемой) поверхности. Естественно, такие особенности прогрева не могут не сказаться на пределе огнестойкости конструкции. При проведении статических расчетов

огнестойкости результаты таких теплотехнических расчетов следует учитывать.

Проведение расчетов в двумерной постановке во многих случаях можно сочетать или даже заменить расчетами в одномерной постановке и получать при этом достаточно надежные результаты. Результаты одномерных расчетов представлены в [15, 16], где они использовались для оценки уровня прогрева тьюбингов различной массивности и построения номограмм для оценки времени достижения конструкциями критических значений температур. Учитывалась теплопередача от тьюбингов в окружающий их грунт. Для этого в [16] рекомендовано рассматривать в качестве грунта сухой известняк, как имеющий минимальный коэффициент температуропроводности. В [16] представлены также соответствующие ТФХ известняка: $\rho = 2100 \text{ кг/м}^3$; $\lambda = 1,25 \text{ Вт/(м}\cdot\text{K)}$; $c = 920 \text{ Дж/(кг}\cdot\text{K)}$. Рекомендовано проводить расчеты для слоя грунта толщиной до 300 мм.

Следуя этой логике, был проведен пересчет результатов оценки прогрева тьюбинга в первом эксперименте на случай его использования при натурной эксплуатации, т.е. при контактировании с окружающим тьюбинг грунтом (кривая 2 на рис. 6). Установлено, что уровень прогрева его наружной поверхности, зафиксированный перед разрушением испытываемых образцов (654 °С), в случае контакта с грунтом был бы достигнут значительно раньше (приблизительно на 42-й минуте). Это объясняется гораздо большим теплосъемом с необогреваемой поверхности опытного образца за счет излучения в окружающее пространство по сравнению с теплопередачей от тьюбинга в грунт. Поэтому при указанном уровне нагрузок в натуральных условиях фактический предел огнестойкости чугунного тьюбинга будет значительно ниже зафиксированного в эксперименте уровня (54 мин). Конструкция данного тьюбинга не будет соответствовать в натуральных условиях даже показателю R45, указанному в «Отчете» об огневых испытаниях.

Подобным образом можно смоделировать ситуацию, когда испытывался бы рассматриваемый опытный образец со слоем теплоизоляции из минераловатных плит толщиной 150 мм на его необогреваемой поверхности (как во втором огневом эксперименте). Расчеты проводились при значениях ТФХ теплоизоляции, указанных в [15, 16] для плит ROCKWOOL CONLIT SL 150: $\rho = 165 \text{ кг/м}^3$; $\lambda = 0,0569 + 0,00011T \text{ Вт/(м}\cdot\text{K)}$; $c = 752 + 0,63T \text{ Дж/(кг}\cdot\text{K)}$. Расчеты (см. кривую 3 на рис. 6) показали, что такой слой еще сильнее затрудняет теплопередачу от тьюбинга, в результате чего время его прогрева до указанной критической температуры (в данном случае 654 °С) было бы еще ниже, чем при моделировании теплопередачи в грунт, и прогнозируемый предел огнестойкости тьюбинга составил бы всего порядка 34 мин.

Указанный инструмент математического моделирования, примененный в ходе анализа рассмотренных экспериментальных данных, позволил провести теплотехнические расчеты с целью оценки уровня прогрева тубингов в зависимости от приведенной толщины металла и времени огневого воздействия по аналогии с расчетами, проведенными ранее авторами [15, 16] в одномерной постановке для варианта теплопередачи от тубингов в грунт (сухой известняк). Их результаты представлены в виде номограмм на рис. 7.

Подобные номограммы можно использовать для приближенных оценок огнестойкости чугунных тубингов различных типоразмеров. Однако, как отмечалось ранее, в некоторых случаях возникает необходимость проведения теплотехнических расчетов в двумерной постановке. Это позволяет учитывать неравномерность прогрева тубингов с конкретными размерами и конфигурацией, что может и должно учитываться при проведении статических расчетов огнестойкости. В качестве примера (рис. 8) представлены результаты таких расчетов. Они демонстрируют, что при учете теплопередачи от тубинга в грунт имеет место большая неравномерность прогрева конструкции по сравнению с рассмотренным выше случаем, когда при испытаниях происходит теплоотдача в окружающее пространство с открытой наружной поверхности тубинга.

Проведенные расчеты наглядно свидетельствуют, что практически во всех случаях при отсутствии огнезащиты не обеспечивается предел огнестойкости чугунных тубингов, имеющих типовые размеры, на уровне 60 мин (и, тем более, 90 мин). Это касается тубингов для перегонных тоннелей с заданным пределом огнестойкости 90 мин и даже тубингов для эскалаторов с пределом огнестойкости 60 мин. Следовательно, основное внимание при проведении огневых испытаний под нагрузкой и при проведении расчетов должно уделяться оценке и обеспечению заданной огнестойкости за счет использования рациональной огнезащиты.

Как отмечалось, в качестве варианта огнезащиты, способной повысить огнестойкость чугунных тубингов обделки до требуемого уровня, рассматривается использование конструктивной огнезащиты (облицовки) плитами «ПРОЗАСК Файерпанель». Кроме отмеченных ранее положительных качеств, отметим, что с ними уже проведено наибольшее (по сравнению с другими средствами огнезащиты) количество огневых испытаний конструкций под нагрузкой, подтвердивших работоспособность и огнезащитную эффективность как самих плит, так и элементов их крепления к защищаемым конструкциям. Это обусловлено оптимальными физико-механическими ха-

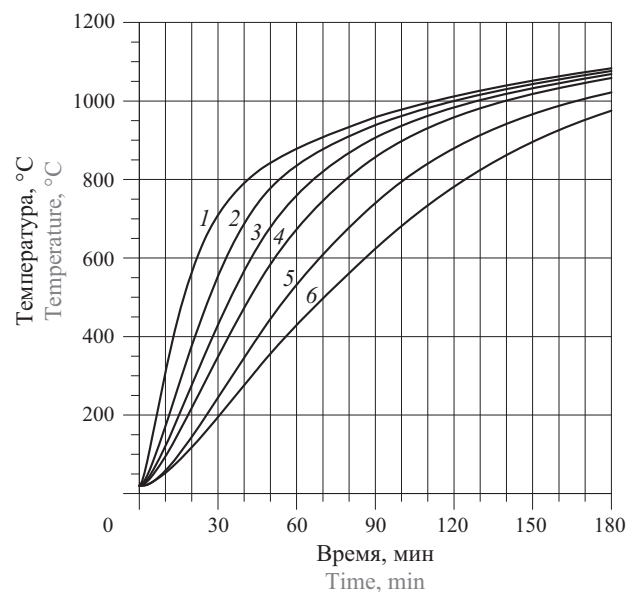


Рис. 7. Зависимости от времени температуры необогреваемой поверхности чугунного тубинга без огнезащиты для конструкций с приведенной толщиной металла, равной: 1 — 10 мм; 2 — 30 мм; 3 — 50 мм; 4 — 70 мм; 5 — 100 мм; 6 — 150 мм

Fig. 7. Dependences between the exposure time and the temperature of the unheated surface of cast-iron tubing (without fire protection) in constructions, featuring the reduced thickness of metal: 1 — 10 mm; 2 — 30 mm; 3 — 50 mm; 4 — 70 mm; 5 — 100 mm; 6 — 150 mm

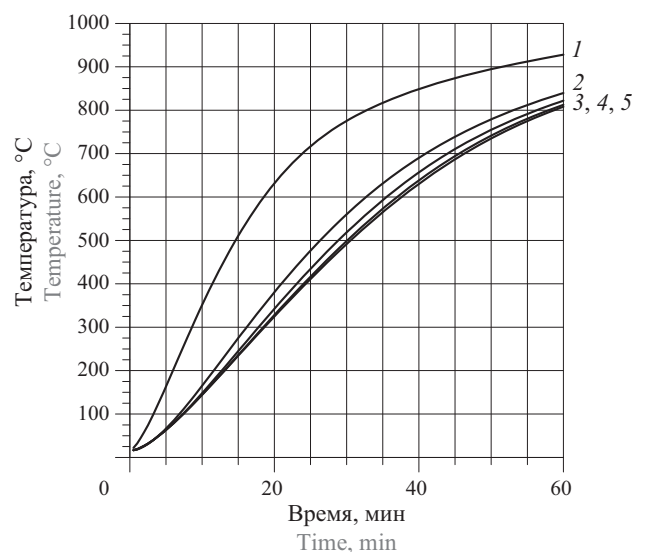


Рис. 8. Зависимости от времени температуры кончика (торца) ребра 1 тубинга толщиной 32 мм и температуры на необогреваемой поверхности спинки толщиной 32 мм у основания ребра 2, а также на удалении от него на 100 мм — 3; 200 мм — 4; 300 мм — 5 (огнезащита отсутствует)

Fig. 8. Dependences between the exposure time and the temperature of the tubing edge that is 32 mm thick 1, the temperature of the unheated back surface of the rib base area that is 32 mm thick 2 and the temperature at the distance of 100 mm — 3; 200 mm — 4; 300 mm — 5 from it; (no fire protection)

рактеристиками таких плит, позволяющими в течение значительного времени сохранять их целостность при огневом воздействии и существенном деформировании несущих конструкций вследствие силовых нагрузок. Отметим, что данный материал имеет согласованные с ГУП «Московский метрополитен» Технические условия ТУ 23.61.11-002-01595455-2018 «Система огнезащиты конструкций метрополитена плитами огнезащитными на цементном связующем с легким минеральным наполнителем, армированными с двух сторон стеклосеткой, негорючими, с односторонним защитным покрытием «ПРОЗАСК Файерпанель», что также позволило бы беспрепятственно применять их на объектах метрополитена.

В ходе анализа результатов второго огневого эксперимента проведена серия теплотехнических расчетов для чугунного тубинга с огнезащитой плитами. Использовались указанные ранее характеристики тубинга, а также предварительные данные по ТФХ цементных огнезащитных плит: коэффициент теплопроводности $0,391 \text{ Вт/(м}\cdot\text{К)}$, удельная теплоемкость $1444 \text{ Дж/(кг}\cdot\text{К)}$, плотность 1100 кг/м^3 . Значения ТФХ для слоя теплоизоляции толщиной 150 мм принимались как для минераловатных плит ROCKWOOL CONLIT SL 150. Результаты расчетов прогрева рассматриваемого тубинга с огнезащитой в условиях второго эксперимента представлены на рис. 9.

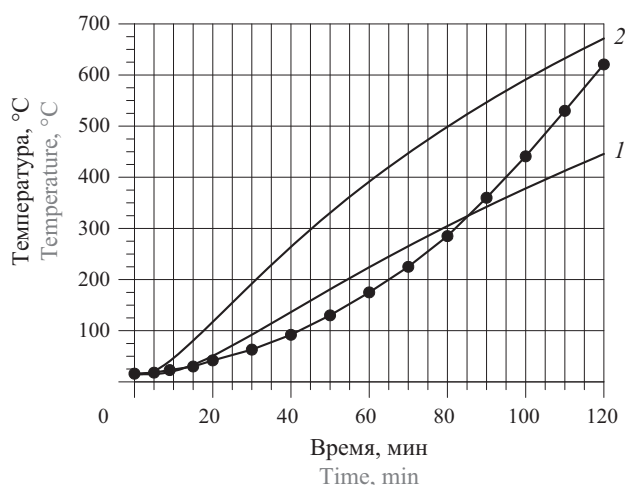


Рис. 9. Зависимости от времени температуры наружной поверхности чугунного тубинга с огнезащитой плитами «ПРОЗАСК Файерпанель» при стандартном температурном с учетом наличия теплоизоляции наружной поверхности минераловатными плитами: расчет при толщине огнезащиты, равной 25 мм — 1 и $12,5 \text{ мм}$ — 2; —•••••— измерения температуры (под слоем изоляции) во втором огневом эксперименте

Fig. 9. Dependences between the exposure time and the temperature of the external surface of the cast-iron tubing, that has PROZASK fire panels, at the standard temperature: the calculation is made for the case when the fire insulation layer is 25 mm thick — 1 and 12.5 mm thick — 2; —•••••— temperature measurements (under the insulation layer) in the second fire experiment

Сопоставление расчетной кривой 1 с экспериментальной показало, что расчетные значения температуры конструкции до 85–90-й минуты не ниже, чем при испытаниях (что важно). К тому же они практически совпадают в наиболее интересующий нас период испытания (90-я минута). После 90-й минуты отмечается некоторое, а, в дальнейшем, значительное занижение расчетных температур по сравнению с экспериментальными. Такое расхождение может быть объяснено частичным нарушением целостности огнезащиты в завершающий период испытания (появление щелей между огнезащитой и тубингом, а также между плитами, отслоение наружного слоя плит), что и было отмечено при осмотре образцов после испытаний и показано на рис. 5. Косвенным подтверждением сказанного является кривая 2 на рис. 9. Она демонстрирует, что для толщины огнезащиты, в два раза меньшей ($12,5 \text{ мм}$ вместо 25 мм), т.е. при отсутствии одного слоя плит уровень прогрева наружной поверхности тубинга был бы значительно выше и в период окончания испытания (120-я минута) мог бы оказаться на уровне, зафиксированном при термпарных измерениях. Понятно, что в условиях деформирования исследуемого образца в огнезащите происходят сложные процессы, зафиксировать и объяснить которые затруднительно. Однако результаты данного эксперимента подтверждают необходимость проведения испытаний конструкций с огнезащитой при нагрузках, поскольку только они способны объективно подтвердить ее работоспособность.

В целом результаты второго эксперимента свидетельствуют об эффективности рассматриваемого варианта конструктивной огнезащиты, которая позволяет с большим запасом обеспечить предел огнестойкости 90 мин, задаваемый для чугунных тубингов обделки перегонных тоннелей. Эксперимент был прекращен на 121-й мин без нарушения целостности образца и без превышения критической величины прогиба конструкции. Фиксация температуры тубинга показала, что только на 121-й минуте она приблизилась (оставаясь ниже) к уровню критической температуры (636°C), обозначенной в [15, 16] в качестве характерной для конструкций из чугуна.

Кроме того, следует отметить, что имеется еще один фактор, свидетельствующий, что соответствие тубинга классификации R120 установлено со значительным запасом. Это связано с тем, что уровень прогрева наружной поверхности тубинга, зафиксированный при окончании эксперимента (625°C), в натуральных условиях, т.е. в случае контакта тубинга с окружающим его грунтом, был бы значительно ниже, чем в эксперименте. Связано это, как отмечалось, с различием ТФХ для грунта и теплоизоляции,

используемой при испытаниях. Теплопередача от тьюбинга в грунт существенно выше, чем при использовании теплоизоляции.

Таким образом, даже один огневой эксперимент продемонстрировал работоспособность и высокую эффективность конструктивной огнезащиты плитами «ПРОЗАСК Файерпанель» и показал принципиальную возможность обеспечения требуемого предела огнестойкости тьюбингов (90 мин) толщинах огнезащиты меньше 25 мм. В ходе анализа результатов этого, а также первого огневого эксперимента продемонстрированы возможности теплотехнических расчетов и показана необходимость их использования при обеспечении огнезащиты и заданной огнестойкости рассматриваемых конструкций.

Теплотехнические расчеты в двумерной постановке, которые также проводились в ходе анализа, показали, что в том случае, когда вся поверхность тьюбинга перекрыта огнезащитой, включая и торцы ребер, неравномерность прогрева относительно невелика, и могут проводиться расчеты в одномерной постановке. Иная ситуация, когда не допускается уменьшение внутреннего диаметра обделки тоннеля и торцы ребер остаются незащищенными. В этом случае неизбежен неравномерный нагрев тьюбинга, и крайне желательно проведение расчетов в двумерной постановке.

Подобная ситуация рассмотрена в [16], где предложен вариант огнезащиты из минераловатных плит ROCKWOOL CONLIT SL 150. Этот вариант предусматривал размещение плит на поверхности полки (спинки) и по боковой поверхности ребер. При этом внутренний диаметр обделки тоннеля не уменьшался и допускался нагрев открытых торцов ребер. В [17] рассматриваются результаты двух расчетов в одномерной постановке: для определения температуры ребер без огнезащиты (приведенная толщина металла принята равной высоте ребра) и температуры зон с огнезащитой (приведенная толщина металла равняется толщине спинки). Далее проводилось определение средней температуры тьюбинга. По результатам расчетов построены номограммы.

Такой подход и подобные номограммы, естественно, могут использоваться. Но когда происходит неравномерный нагрев конструкции, как в случае с незащищенными торцами ребер, более целесообразны расчеты в двумерной постановке. Они востребованы как для оценки эффективности огнезащиты, так и для оценки огнестойкости конструкций. На рис. 10 в качестве примера представлены результаты прогрева тьюбинга с вариантом огнезащиты, предложенным в [16].

Полученные результаты демонстрируют больший уровень средней температуры тьюбинга по сравнению с [16], а также значительный уровень прогрева ребра у его открытого торца. Отмечается, что недостатком

рассмотренного в статье способа огнезащиты является сложность обеспечения крепления плит на внутреннюю поверхность тьюбингов, а также отсутствие влагостойкости данной системы при практически повсеместных водопрооявлениях в тоннелях. В этом плане прошедший огневые испытания под нагрузкой способ огнезащиты плитами «ПРОЗАСК Файерпанель» имеет преимущества. Однако, если обязательным условием будет недопущение уменьшения внутреннего диаметра обделки тоннеля, может быть предложен вариант конструктивного исполнения (крепления) с использованием плит «ПРОЗАСК Файерпанель» «заподлицо» (при изменении конструкции подкаркаса путем уменьшения высоты его вертикальных полок) или на незначительном отдалении от незащищенных торцов ребер. При таком варианте монтажа плит уровень прогрева тьюбинга будет даже несколько ниже, что видно из сопоставления результатов расчетов для плиты ROCKWOOL CONLIT толщиной 20 мм на рис. 10 и 11.

Если рассматривать вариант огнезащиты с ее размещением по аналогии с [16] по всей внутренней поверхности тьюбинга, то более рациональным представлялось бы использование не плит, а рулонных огнезащитных материалов. Но в таком случае мы также столкнулись бы с отсутствием эксплуатационной долговечности таких материалов по причине отсутствия их стойкости к намоканию. В качестве такой

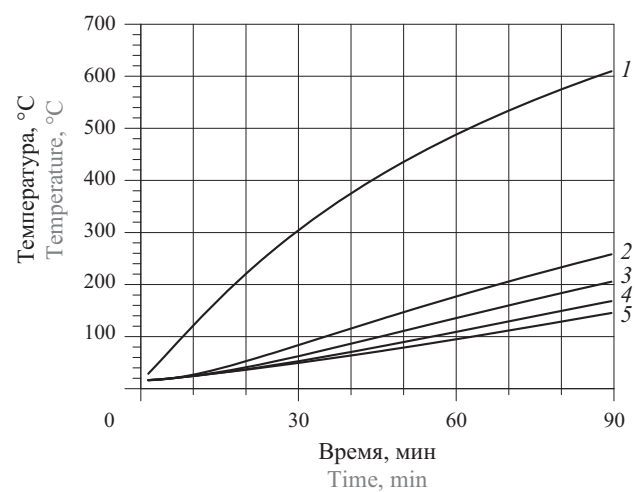


Рис. 10. Зависимости от времени температуры открытого торца ребра 1 тьюбинга и температуры на необогреваемой поверхности спинки у основания ребра 2, а также на удалении от него на 100 мм — 3; 200 мм — 4; 300 мм — 5 от него (the side surfaces of edges and the back are protected by ROCKWOOL CONLIT plates 20 mm thick)

Fig. 10. Dependences between the exposure time and the temperature of the open tubing edge 1, the temperature of the unheated back surface of the edge base 2, as well as at a distance of 100 mm — 3; 200 mm — 4; 300 mm — 5 from it (the side surfaces of edges and the back are protected by ROCKWOOL CONLIT plates 20 mm thick)

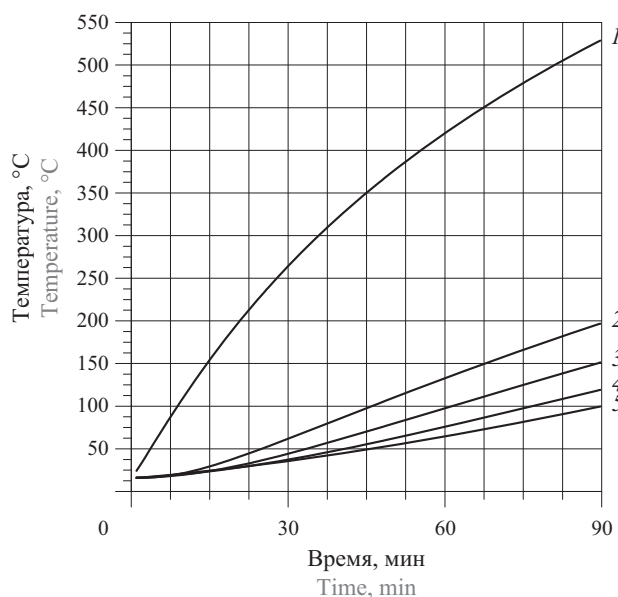


Рис. 11. Зависимости от времени температуры открытого торца ребра 1 тубинга и температуры на необогреваемой поверхности спинки у основания ребра 2, а также на удалении от него на 100 мм — 3; 200 мм — 4; 300 мм — 5 (огнезащита плитой ROCKWOOL CONLIT толщиной 20 мм, расположенной параллельно спинке «заподлицо» с открытой поверхностью ребра)

Fig. 11. Dependences between the exposure time and the temperature of the open edge 1 of the tubing, and the temperature of the unheated surface of the back at the edge base 2, as well as at a distance of 100 mm — 3; 200 mm — 4; 300 mm — 5 (ROCKWOOL CONLIT panels that are 20 mm thick are parallel with the back and fixed at the same level as the open edge)

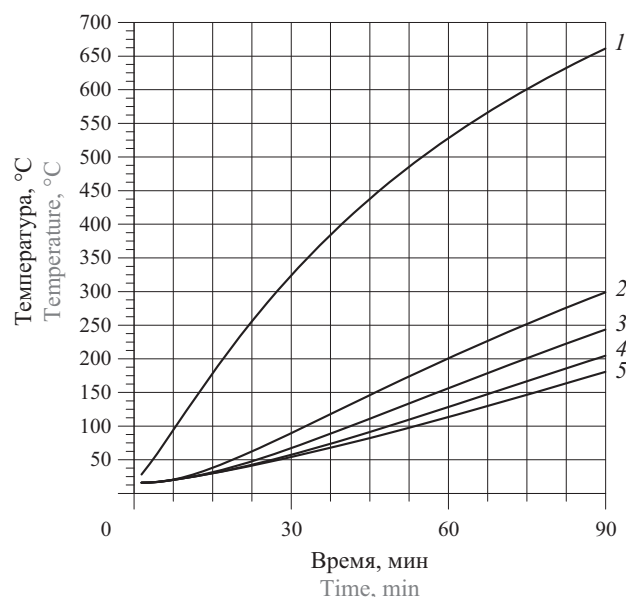


Рис. 12. Зависимости от времени температуры открытого торца ребра 1 тубинга и температуры на необогреваемой поверхности спинки у основания ребра 2, а также на удалении от него на 100 мм — 3; 200 мм — 4; 300 мм — 5 (огнезащита боковой поверхности ребер и спинки огнезащитой на основе рулонного материала МБОР-20Ф толщиной 20 мм)

Fig. 12. Dependences between the exposure time and the temperature of the open edge 1 of the tubing and the temperature of the unheated surface of the back at the edge base 2, as well as at a distance of 100 mm — 3; 200 mm — 4; 300 mm — 5 from it (the side surface of the edge and back are protected by the roll material MBOR-20F 20 mm thick)

огнезащиты, мы можем рассмотреть материал МБОР (базальтоволокнистый огнезащитный рулонный фольгированный), который крепится к защищаемой поверхности клеевым огнезащитным составом на неорганической основе «ПЛАЗАС». На рис. 12 представлены результаты расчетов для такого варианта огнезащиты. Они проведены для слоя огнезащиты толщиной 20 мм (МБОР-20Ф). Использовались следующие теплофизические характеристики: $\rho = 110 \text{ кг/м}^3$; $c = 1000 \text{ Дж/(кг} \cdot \text{K)}$; $\lambda = 0,032 \text{ Вт/(м} \cdot \text{K)}$ (273K); $0,052 \text{ Вт/(м} \cdot \text{K)}$ (398K); $0,09 \text{ Вт/(м} \cdot \text{K)}$ (573K); $0,122 \text{ Вт/(м} \cdot \text{K)}$ (573K); $0,36 \text{ Вт/(м} \cdot \text{K)}$ (1473K). На рис. 12 получен несколько больший уровень нагрева, чем на рис. 10, что объясняется различием ТФХ материалов. Однако вариант использования рулонного материала МБОР-20Ф с клеевым составом «ПЛАЗАС» представляется более предпочтительным по технологическим соображениям по сравнению с вариантом использования огнезащитных минераловатных плит.

Кроме того, с помощью теплотехнических расчетов можно проводить прогнозирование огнестойкости чугунных тубингов при режимах огневого воздействия, отличающихся от стандартного температурного режима. Используемые в ходе анализа методики расчетов в одномерной и двумерной поста-

новке предоставляют такие возможности. Например, можно проводить оценки пределов огнестойкости в условиях воздействия по режиму горения углеводородного горючего по ГОСТ Р ЕН 1363-2-2014. Могут задаваться также режимы, параметры которых определяются в ходе крупномасштабных экспериментов или в ходе расчетов по соответствующим методикам для вероятного сценария развития аварийной ситуации в тоннеле метрополитена.

Ниже представлены результаты серии расчетов, проведенных для рассматриваемого чугунного тубинга с приведенной толщиной металла 34,7 мм при огневом воздействии по одному из режимов пожара в тоннеле метрополитена. Изменение от времени температуры газовой среды для этого режима представлено на рис. 13 (кривая 1). Приведенная кривая получена в ходе математического моделирования для одного из вероятных сценариев развития аварийной ситуации в тоннеле с использованием полученной в [24] временной зависимости изменения от времени мощности пожара в одном вагоне метрополитена, учитывающей особенности процесса горения в его ограниченном объеме тоннеля.

Прежде всего были проведены расчеты в одномерной постановке для тубинга без огнезащиты,

в результате которых получены зависимости от времени температуры на внутренней и наружной (контактирующей с грунтом) поверхности тьюбинга (кривые 2 на рис. 13). Для данного (немонотонного) режима в соответствующие моменты времени температура газовой среды ниже, чем при стандартном режиме. Поэтому, естественно, и уровень прогрева тьюбинга оказался ниже, чем при стандартном режиме (см. рис. 8).

В данном случае прогнозируется максимальный уровень нагрева тьюбинга (860 °C) на 110-й минуте. Критический (для конструкций из чугуна при данном приложении нагрузки) уровень температуры, указанный ранее (636 °C), достигается на 90-й минуте, а критический уровень, зафиксированный в ходе первого огневого эксперимента во ВНИИПО (654 °C), достигается на 92-й минуте. После этого уровень прогрева существенно снижается. Казалось бы, это — хороший результат, но при этом следует учесть, что приложенные вертикальные нагрузки во время огневых испытаний относительно невелики, поскольку условно соответствовали глубине заложения тью-

бингов не более 10 м. К тому же законодательство требует проведения расчетов при стандартных огневых нагрузках. Поэтому данные расчеты невозможно распространить в целом на все объекты метрополитена.

При этом еще одним из неисследованных вопросов является поведение металлических деталей болтовых соединений в обделках при температурах, превышающих 500 °C. Такие температуры сами по себе являются условно критическими для стальных конструкций, но кроме этого следует учесть, что работа соединения, например, на срез часто сильно осложнена несоответствиями форм болтов и стенок отверстия, что еще больше затрудняет расчеты, особенно на огнестойкость болтовых соединений.

Также следует учесть, что расчеты сделаны для приведенной толщины металла на уровне 35 мм, т.е. не для всех типов чугунных тьюбингов.

Для данного режима огневого воздействия проведены также расчеты для тьюбинга с огнезащитой плитами «ПРОЗАСК Файерпанель» толщиной 12,5 и 25 мм, т.е. с одним и двумя слоями облицовки (см. рис. 13). Они показали, что использование такой огнезащиты с гарантированным запасом обеспечивает огнестойкость чугунного тьюбинга. Также следует отметить, что применение огнезащиты повышает и огнестойкость болтовых соединений, выполненных из стали. Подобным образом может проводиться моделирование (прогнозирование) уровня прогрева тьюбингов метрополитена при любых вероятных режимах и продолжительности пожара.

Выводы

Проведен детальный теплотехнический анализ результатов двух огневых экспериментов, впервые проведенных для оценки огнестойкости чугунных тьюбингов обделки тоннелей при действии выбранных при испытаниях нагрузок. Анализ позволил получить значительный объем важной информации, представляющей несомненный практический интерес для обеспечения огнезащиты и заданной огнестойкости указанных ответственных конструкций и дальнейшего развития данного важного направления экспериментальных и теоретических исследований.

Представленные в статье данные демонстрируют, что теплотехнические расчеты являются эффективным инструментом для выбора материалов, оценки эффективности и толщин огнезащиты еще до проведения огневых испытаний чугунных тьюбингов. Причем прогнозирование эффективности огнезащиты и огнестойкости конструкций может проводиться для различных режимов огневого воздействия. Полученные таким образом результаты могут учитываться при оценках огнестойкости рассматриваемых несущих конструкций в ходе статических расчетов.

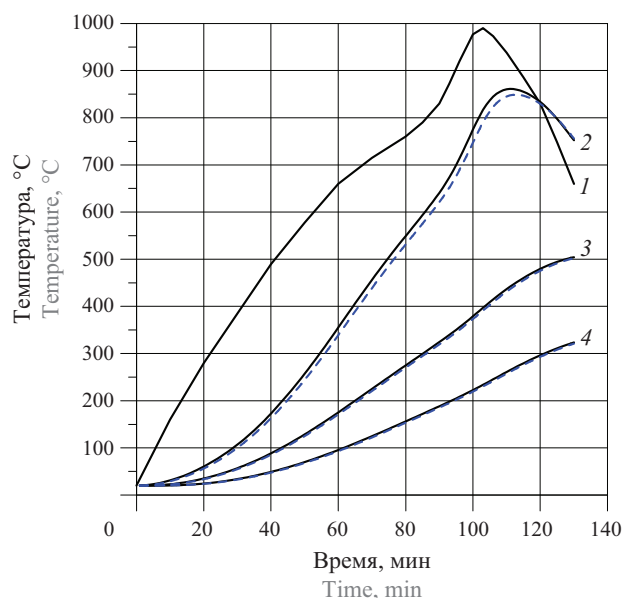


Рис. 13. Один из вероятных режимов пожара в тоннеле метрополитена 1 и зависимости от времени температуры наружной (в контактирующей с грунтом) поверхности чугунного тьюбинга без огнезащиты 2 и с огнезащитой при толщине облицовки из плит «ПРОЗАСК Файерпанель», равной 12,5 мм — 3 и 25 мм — 4. Для кривых 2–4: — — — — — внутренняя поверхность тьюбинга, — — — — — наружная поверхность тьюбинга

Fig. 13. One of probable fire regimes in a subway tunnel 1 and dependences between the exposure time and temperature of the external (in contact with soil) surface of the castiron tubing that has no fire protection 2 and if the fire protection by PROZASK fire panels, whose thickness is 12.5 mm — 3 and 25 mm — 4, is available. For curves 2–4: — — — — — the inner surface of the tubing, — — — — — the external surface of the tubing

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Голованов В.И., Пехотиков А.В., Павлов В.В., Новиков Н.С. Огневые испытания тьюбингов тоннельной обделки // Пожарная безопасность. 2019. № 4 (97). С. 50–55. URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=41442482>
2. Голованов В.И., Пехотиков А.В., Новиков Н.С., Павлов В.В., Кузнецова Е.В. Огнестойкость железобетонных тьюбингов 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
3. Kordina K. Brände in unterirdischen Verkehrsanlagen // Bautechnik. 2003. Nr. 80. Heft 5. Pp. 327–338. DOI: 10.1002/bate.200302620
4. Dehn F., Werther N., Knitl J. Großbrandversuche für den city-tunnel Leipzig // Beton- und Stahlbetonbau, 2006. Nr. 101. Heft 8. Pp. 631–635. DOI: 10.1002/best200608186
5. 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
6. 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 Assembly. Dubrovnik, Croatia, 2015. Pp. 1–10.
7. Pagani E., Cassani G. Terzo valico dei Giovi: Milan-Genoa high speed/High capacity line // Proceedings of Swiss Tunnel Congress, Luzern, 2016. Pp. 48–57.
8. Chiarini M., Lunard G., Cassani G., Bellocchio A., Frandino M. High Speed Railway Milan – Genoa, implementation of coupled analysis to estimate thermo-mechanical effects produced by the fire on the TBM segmental lining // Proceedings of the World Tunnel Congress 2017 — Surface challenges — Underground solutions. Bergen, Norway, 2017. Pp. 1–10.
9. Fire testing procedure for concrete tunnel and other tunnel components // Report No. Efectis-R0695:2020. EfectisNederland BV, 2020. Pp. 1–46.
10. Меркин В.Е., Зерцалов М.Г., Петрова Е.Н. Подземные сооружения транспортного назначения : учеб. пос. М. ; Вологда : Инфра-Инженерия, 2020. 432 с.
11. Porter A., Wood C., Fidler J., McCaig I. The behavior of structural cast iron in fire // English Heritage Transaction. 1998. Vol. 1. Pp. 11–20.
12. Maraveas C., Wang Y.C., Swailes T., Sotiriadis G. An experimental investigation of mechanical properties of structural cast iron at elevated temperatures and after cooling down // Fire Safety Journal. 2015. Vol. 71. Pp. 340–352. DOI: 10.1016/j.firesaf.2014.11.026
13. Maraveas C., Wang Y.C., Swailes T. Fire resistance of 19th century fireproof flooring systems: A sensitivity Analysis // Construction and Building Materials. 2014. Vol. 55. Pp. 69–81. DOI: 10.1016/J.CONBUILDMAT.2014.01.022
14. Maraveas C., Wang Y.C., Swailes T. Elevated temperature behavior and fire resistance of cast iron columns // Fire Safety Journal. 2016. Vol. 82. Pp. 37–48. DOI: 10.1016/j.firesaf.2016.03.004
15. 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. URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=25866626>
16. Голиков А.Д., Черкасов Е.Ю., Данилов А.И., Сиваков И.А. Способ огнезащиты обделки транспортных тоннелей из чугунных тьюбингов // Пожаровзрывобезопасность/Fire and Explosion Safety. 2016. Т. 25. № 12. С. 22–29. DOI: 10.18322/PVB.2016.25.12.22-29
17. Пронин Д.Г., Тимонин С.А., Голованов В.И. СТО АРСС 11251254.001-018-03. Проектирование огнезащиты несущих стальных конструкций с применением различных облицовок. М. : АРСС, 2018. 70 с.
18. Голованов В.И., Павлов В.В., Пехотиков А.В. Инженерный метод расчета огнестойкости стальных конструкций с огнезащитой плитами КНАУФ-Файерборд // Пожарная безопасность. 2016. № 3. С. 171–179. URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=26731725>
19. Голованов В.И., Павлов В.В., Пехотиков А.В. Огнезащита стальных конструкций плитным материалом PYRO-SAFE AESTUVER T // Пожаровзрывобезопасность/Fire and Explosion Safety. 2016. Т. 25. № 11. С. 60–70. DOI: 10.18322/PVB.2016.25.11.8-16
20. Яковлев А.И. Расчет огнестойкости строительных конструкций. М. : Стройиздат, 1988. 143 с.
21. Страхов В.Л., Гаращенко А.Н., Рудзинский В.П. Программные комплексы для расчетов тепло-массопереноса в строительных конструкциях с огнезащитой с учетом термического разложения,

- вспучивания-усадки и испарения-конденсации // Пожаровзрывобезопасность/Fire and Explosion Safety. 2001. Т. 10. № 4. С. 9–11.
22. Исаченко В.П., Осипов В.А., Сукомел А.С. Теплопередача : учеб. для вузов. 3-е изд., перераб. и доп. М. : Энергия, 1974. 488 с.
 23. Володин Ю.Г., Дульнев Г.Н. Исследование конвективного теплообмена в замкнутом пространстве // Инженерно-физический журнал. 1965. Т. 9. № 5. С. 603–608.
 24. Данилов А.И., Маслак В.А., Вагин А.В., Сиваков И.А. Численное моделирование пожара в вагоне метрополитена // Пожаровзрывобезопасность/Fire and Explosion Safety. 2017. Т. 26. № 10. С. 27–35. DOI: 10.18322/PVB.2017.26.10.27-35

REFERENCES

1. Golovanov V.I., Pekhotikov A.V., Pavlov V.V., Novikov N.S. Fire tests of tunnel lining tubings. *Pozharnaja bezopasnost/Fire Safety*. 2019; 4(97):50-55. URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=41442482> (rus).
2. Golovanov V.I., Pekhotikov A.V., Pavlov V.V., Novikov N.S. Fire resistance of reinforced concrete tubings of underground structures with polypropylene fiber. *Pozharovzryvbezopasnost/Fire and Explosion Safety*. 2019; 28(5):60-70. DOI: 10.18322/PVB.2019.28.05.60-70 (rus).
3. Kordina K. Brände in unterirdischen Verkehrsanlagen. *Bautechnik*. 2003; 80(5):327-338. DOI: 10.1002/bate.200302620
4. Dehn F., Werther N., Knitl J. Großbrandversuche für den city-tunnel Leipzig. *Beton- und Stahlbetonbau*. 2006; 101(8):631-635. DOI: 10.1002/best.200608186
5. 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
6. Emmanuel Annerel, Kees Boch, Tony Lemaire. 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 Assembly. Dubrovnik, Croatia, 2015*. 2015; 1-10.
7. Pagani E., Cassani G. Terzo valico dei Giovi: Milan-Genoa high speed/High capacity line. *Proceedings of Swiss Tunnel Congress, Luzern, 2016*. 2016; 48-57.
8. Chiarini M., Lunardi G., Cassani G., Bellocchio A., Frandino M. High speed railway Milan – Genoa, implementation of coupled analysis to estimate thermo-mechanical effects produced by the fire on the TBM segmental lining. *Proceedings of the World Tunnel Congress 2017 – Surface challenges – Underground solutions. Bergen, Norway, 2017*. 2017; 1-10.
9. Fire testing procedure for concrete tunnel and other tunnel components. *Report No. Efectis-R0695:2020. EfectisNederland BV, 2020*; 1-46.
10. Merkin V.E., Zertsalov M.G., Petrova E.N. *Underground structures for transport purposes : textbook*. Moscow, Vologda, Infra-Engineering, 2020; 432.
11. Porter A., Wood C., Fidler J., McCaig I. The behavior of structural cast iron in fire. *English Heritage Transaction*. 1998; 1:11-20.
12. Maraveas C., Wang Y.C., Swailes T., Sotiriadis G. An experimental investigation of mechanical properties of structural cast iron at elevated temperatures and after cooling down. *Fire Safety Journal*. 2015; 71:340-352. DOI: 10.1016/j.firesaf.2014.11.026
13. Maraveas C., Wang Y.C., Swailes T. Fire resistance of 19th century fireproof flooring systems: A sensitivity analysis. *Construction and Building Materials*. 2014; 55:69-81. DOI: 10.1016/J.CONBUILD-MAT.2014.01.022
14. Maraveas C., Wang Y.C., Swailes T. Elevated temperature behavior and fire resistance of cast iron columns. *Fire Safety Journal*. 2016; 82:37-48. DOI: 10.1016/j.firesaf.2016.03.004
15. Golikov A.D., Cherkasov E.Yu., Danilov A.I., Sivakov I.A. Fire resistance of cast iron tunnel lining without fireproof covering. *Pozharovzryvbezopasnost/Fire and explosion safety*. 2014; 23(12):20-27. URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=25866626> (rus).
16. Golikov A.D., Cherkasov E.Yu., Danilov A.I., Sivakov I.A. Method fire protection of cast iron tunnel lining. *Pozharovzryvbezopasnost/Fire and Explosion Safety*. 2016; 25(12):22-29. DOI: 10.18322/PVB.2016.25.12.22-29 (rus).
17. Pronin D.G., Timonin S.A., Golovanov V.I. STO ARSS 11251254.001-018-03. *Design of fire protecting loaded steel constructions using different facings*. Moscow, ARSS, 2018; 70. (rus).
18. Golovanov V.I., Pavlov V.V., Pekhotikov A.V. Engineering method for designing fire resistance of steel constructions protected by KNAUF-Fireboard plates. *Pozharnaja bezopasnost/Fire Safety*. 2016; 3:171-179. URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=26731725> (rus).

19. Golovanov V.I., Pavlov V.V., Pekhotikov A.V. Fire protection of steel structures with slab material PYRO-SAFE AESTUVER T. *Pozharovzryvobezopasnost/Fire and Explosion Safety*. 2016; 25(11):60-70. DOI: 10.18322/PVB.2016.25.11.8-16 (rus).
20. Yakovlev A.I. *Calculation of fire resistance of building constructions*. Moscow, Stroyizdat Publ., 1988; 143. (rus).
21. Strakhov V.L., Garashchenko A.N., Rudzinskii V.P. Software for simulation of temperature fields in fire resistant building constructions with taking into account the processes of thermal decomposition, intumescence – shrinkage and avaporation – condensation. *Pozharovzryvobezopasnost/Fire and Explosion Safety*. 2001; 10(4):9-11. (rus).
22. Isachenko V.P., Osipov V.A., Sukomel A.S. *Heat transfer. Textbook for universities*. 3rd ed., rev. and exp. Moscow, Energy Publ., 1974; 488. (rus).
23. Volodin Yu.G., Dulnev G.N. Investigation of convective heat transfer in a closed space. *Engineering and Physics Journal*. 1965; 9(5):603-608. (rus).
24. Danilov A.I., Maslak V.A., Vagin A.V., Sivakov I.A. Numerical simulation of a subway car fire. *Pozharovzryvobezopasnost/Fire and Explosion Safety*. 2017; 26(10):27-35. DOI: 10.18322/PVB.2017.26.10.27-35 (rus).

Поступила 09.12.2021, после доработки 28.01.2022; принята к публикации 02.02.2022
Received December 9, 2021; Received in revised form January 28, 2022; Accepted February 2, 2022

Информация об авторах

ГАРАШЕНКО Анатолий Никитович, д-р техн. наук, доцент, ведущий научный сотрудник, Центр исследований опасных факторов пожаров, Россия, 191002, г. Санкт-Петербург, ул. Марата, 51; ORCID: 0000-0002-8143-944X; e-mail: a.n.gar@mail.ru

ДАНИЛОВ Андрей Игоревич, генеральный директор, Центр исследований опасных факторов пожаров, Россия, 191002, г. Санкт-Петербург, ул. Марата, 51; ORCID: 0000-0002-9162-7073; e-mail: danilov@ciofp.ru

АНТОНОВ Сергей Порфирьевич, генеральный директор, ПРОЗАСК, Россия, 107564, г. Москва, ул. Краснобогатyrская, 42, стр. 1; ORCID: 0000-0002-2664-1397; e-mail: asp@prozask.ru

МАРЧЕНКОВА Светлана Васильевна, канд. экон. наук, доцент кафедры городского кадастра, Государственный университет по землеустройству, 105064, Москва, ул. Казакова, 15; ORCID: 0000-0002-2592-6366; e-mail: s.v.marchenkova@yandex.ru

ПАВЛОВ Владимир Валерьевич, начальник сектора огнестойкости конструкций, Всероссийский ордена «Знак Почета» научно-исследовательский институт противопожарной обороны Министерства Российской Федерации по делам гражданской обороны, чрезвычайным ситуациям и ликвидации последствий стихийных бедствий, Россия, 143903, Московская обл., г. Балашиха, мкр. ВНИИПО, 12; РИНЦ ID: 760824; ORCID: 0000-0002-0629-5765; e-mail: vv.pavlov@mail.ru

Вклад авторов:

Гарашенко А.Н. — научное руководство, участие в анализе экспериментальной информации, проведение и анализ результатов расчетов, написание исходного текста, итоговые выводы.

Information about the authors

Anatoliy N. GARASHCHENKO, Dr. Sci. (Eng.), Assistant Professor, Leading Researcher, Research Center of Hazardous Fire Factors, Marata St., 51, Saint-Petersburg, 191002, Russian Federation; ORCID: 0000-0002-8143-944X; e-mail: a.n.gar@mail.ru

Andrey I. DANILOV, Director, Research Center of Hazardous Fire Factors, Marata St., 51, Saint-Petersburg, 191002, Russian Federation; ORCID: 0000-0002-9162-7073; e-mail: danilov@ciofp.ru

Sergey P. ANTONOV, Director, PROZASK, Krasnobogatyrskaya St., 42, bld. 1, Moscow, 107564, Russian Federation; ORCID: 0000-0002-2664-1397; e-mail: asp@prozask.ru,

Svetlana V. MARCHENKOVA, Cand. Sci. (Econ.), Assistant Professor, City Cadastre Department, State University of Land Use Planning, Kazakova St., 15, Moscow, 105064, Russian Federation; ORCID: 0000-0002-2592-6366; e-mail: s.v.marchenkova@yandex.ru

Vladimir V. PAVLOV, Head of Sector, All-Russian Research Institute for Fire Protection of Ministry of Russian Federation for Civil Defense, Emergencies and Elimination of Consequences of Natural Disasters, VNIPO, 12, Balashikha, Moscow Region, 143903, Russian Federation; ID RISC: 760824; ORCID: 0000-0002-0629-5765; e-mail: vv.pavlov@mail.ru

Contribution of the authors:

Anatoliy N. Garashchenko — scientific guidance, participation in the analysis of experimental information, conducting and analyzing the results of text calculations, describing the initial, final results of the survey.

Данилов А.И. — концепция исследования, организация и участие в проведении огневых экспериментов, анализ экспериментальной информации, доработка текста, итоговые выводы.

Антонов С.П. — участие в организации и проведении огневых экспериментов, участие в анализе экспериментальной информации, доработка текста.

Марченкова С.В. — участие в подготовке концепции исследования, участие в анализе экспериментальной информации, участие в подготовке итоговых выводов.

Павлов В.В. — руководство, обеспечение и участие в проведении огневых экспериментов, участие в анализе экспериментальной информации.

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Andrey I. Danilov — conceptual research, organization and participation in various firing experiments, analysis of experimental information, revision of the text, final conclusions.

Sergey P. Antonov — participation in the organization and conduct of firing experiments, participation in the analysis of experimental information, revision of the text.

Svetlana V. Marchenkova — participation in the preparation of the research concept, participation in the analysis of experimental information, participation in the preparation of final conclusions.

Vladimir V. Pavlov — leadership, support and participation in conducting fire experiments, participation in the analysis of experimental information.

The authors declare no conflicts of interests.

ПОЖАРОВЗРЫВОБЕЗОПАСНОСТЬ/FIRE AND EXPLOSION SAFETY. 2022. Т. 31. № 1. С. 40–48
POZHAROVZRYVOBEZOPASNOST/FIRE AND EXPLOSION SAFETY. 2022; 31(1):40-48

НАУЧНАЯ СТАТЬЯ/RESEARCH PAPER

УДК 681.5

<https://doi.org/10.22227/0869-7493.2022.31.01.40-48>

Подход к моделированию технического обслуживания стационарных термохимических газосигнализаторов на установках НПЗ

Илья Вадимович Самарин✉, Алексей Вячеславович Крючков,
Андрей Юрьевич Строгонов

Российский государственный университет нефти и газа (национальный исследовательский университет) имени И.М. Губкина, г. Москва, Россия

АННОТАЦИЯ

Введение. Отмечена значимость датчиков сигнализаторов дозрывных концентраций в процессе обеспечения необходимого уровня пожарной безопасности (ПБ) на пожаровзрывоопасных объектах нефтеперерабатывающих заводов (НПЗ). Обозначена проблема принципа размещения датчиков у источников потенциальных утечек. В качестве объекта исследования выбран процесс технического обслуживания (ТО) стационарных термохимических газосигнализаторов и их датчиков, установленных вокруг открытых технологических установок (ОТУ).

Теоретические основы. Введено понятие дисциплины технического обслуживания (ТО) стационарных термохимических газосигнализаторов. Обоснован выбор данного типа приборов по классификации в соответствии с физическими методами анализа. ТО в качестве процесса обеспечения ПБ на объектах НПЗ зависит от параметров окружающей среды, метеорологических параметров, параметров технологического оборудования. Выделение в процессе переработки нефти на ОТУ каталитических ядов, негативно влияющих на чувствительные элементы (ЧЭ) термохимических датчиков, а также погодные условия обуславливают снижение интервалов калибровки или ускоренный выход из строя ЧЭ. Воздействие факторов среды влечет за собой корректировку сроков калибровки датчиков с учетом регламентированных значений, зафиксированных в рабочей документации.

Результаты исследования. Определены цели для значений функции групп параметров, обосновывающих проведение мероприятий для поддержания датчиков в требуемом документацией состоянии. Критерий оценки дисциплины ТО выражен через вектор целевых функций, отражающих зависимости групп параметров: климатических, работы персонала, специфических, прочих. Интегральный критерий эффективности ТО задан в виде прямоугольной матрицы и свертки, учитывающей три вектора целевых функций. Дисциплина ТО газосигнализаторов представлена в виде дискретного созидательного подпроцесса процесса обеспечения ПБ.

Выводы. Рассмотрен подход к моделированию дисциплины ТО стационарных термохимических газосигнализаторов, установленных вокруг ОТУ НПЗ. Отмечена необходимость оценки пространственного расположения датчиков газосигнализаторов с целью определения их количества в зависимости от периметра ОТУ НПЗ.

Ключевые слова: нефтеперерабатывающий завод; автоматизированная система управления технологическими процессами; пожарная безопасность; термохимический датчик; открытая технологическая установка; техническое обслуживание; чувствительный элемент

Для цитирования: Самарин И.В., Крючков А.В., Строгонов А.Ю. Подход к моделированию технического обслуживания стационарных термохимических газосигнализаторов на установках НПЗ // Пожаровзрывобезопасность/Fire and Explosion Safety. 2022. Т. 31. № 1. С. 40–48. DOI: 10.22227/0869-7493.2022.31.01.40-48

✉ Самарин Илья Вадимович, e-mail: ivs@gubkin.ru

An approach to modeling the maintenance of stationary thermochemical gas analyzers at an oil refinery

Ilya V. Samarina✉, Alexey V. Kryuchkov, Andrey Yu. Stroganov

National University of Oil and Gas "Gubkin University", Moscow, Russian Federation

ABSTRACT

Introduction. The authors draw attention to the importance of the pre-explosive concentration detectors to assure the fire safety (FS) of fire and explosion hazardous facilities at oil refineries. The problem of the principle of placing

detectors close to sources of potential leaks is identified. The subject of research is the process of the maintenance of stationary thermochemical gas analyzers and their detectors installed around open-air facilities (OAF).

Theoretical fundamentals. The notion of the discipline of the maintenance of stationary thermochemical gas analyzers is addressed in this section. The authors justify the choice of this type of devices according to the classification based on physical methods of analysis. Maintenance as a process, focused on the fire and explosion safety at oil refineries, depends on environmental and meteorological parameters, as well as the parameters of the process equipment. The release of catalytic poisons in the process of oil refining at OAFs, which negatively affect the sensitive elements (SE) of thermochemical detectors, and weather conditions may reduce calibration adjustment intervals or cause an accelerated failure of sensitive elements. The impact of environmental factors makes it necessary to adjust the detector calibration dates with account taken of the standard ones specified in the engineering documentation.

Research results. The work sets the goals in terms of the values of the function of groups of parameters that substantiate the implementation of measures focused on the maintenance of detectors in the condition required by the documentation. The maintenance evaluation criterion is expressed as a vector of objective functions that convey the dependencies between groups of climatic, personnel work performance, specific, and other parameters. The integral criterion of the maintenance efficiency is provided in the form of a rectangular matrix and a convolution that takes into account three vectors of objective functions. The discipline of the maintenance of gas analyzers is presented in the form of a discrete subprocess of the process of fire and explosion safety assurance.

Conclusions. This research work addresses an approach to modeling the discipline of the maintenance of stationary thermochemical gas analyzers installed around the open-air facilities (OAF) of an oil refinery. In further studies it is necessary to analyze the spatial location of the gas analyzer detectors to determine their number depending on the perimeter of the oil refinery's open-air facilities.

Keywords: oil refinery; automated process control system; fire safety; thermochemical detector; open-air facility; maintenance, sensitive element

For citation: Samarin I.V., Kryuchkov A.V., Stroganov A.Yu. An approach to modeling the maintenance of stationary thermochemical gas analyzers at an oil refinery. *Pozharovzryvobezopasnost'/Fire and Explosion Safety*. 2022; 31(1):40-48. DOI: 10.22227/0869-7493.2022.31.01.40-48 (rus).

✉ Ilya Vadimovich Samarin, e-mail: ivs@gubkin.ru

Введение

Одними из наиболее значимых мер для предотвращения пожаров и взрывов на объектах нефтеперерабатывающих заводов (НПЗ) являются способы информирования дежурной смены о состоянии среды в зоне их ответственности. Практики предупреждения, наискорейшего обнаружения и устранения источника возгорания на предприятиях повышенной пожарной опасности непрерывно совершенствуются [1–3]. Как правило, необходимые для мониторинга и анализа данные передают датчики сигнализаторов, устанавливаемые во всех критически важных с точки зрения возникновения опасных ситуаций местах внутри контролируемой зоны. Датчики газосигнализаторов являются первым звеном информирования в системах раннего обнаружения и предупреждения пожаров. Их готовность к использованию становится ключевым фактором обеспечения пожарной безопасности (ПБ), особенно с учетом ограниченного особыми условиями ресурса [4]. Отсутствие точных указаний на месторасположение датчиков связано с тем, что заранее определить места их размещения на объектах НПЗ затруднительно. Это связано с большой номенклатурой газов, которые необходимо обнаружить, различными окружающими условиями, значениями температур и давлений. Общий принцип — размещать «как можно ближе» к источникам

потенциальных утечек¹. Способ размещения датчиков сигнализаторов дозврывных концентраций на открытых технологических установках (ОТУ) на сегодняшний день регламентируют «Требования к установке сигнализаторов и газосигнализаторов (ТУ-газ-86)»². Однако документ содержит лишь примерный порядок размещения датчиков на открытых установках двух типов (шириной до 30 м и более 30 м), а также указания о его минимальном радиусе обслуживания. 1 января 2021 года вступил в силу приказ³. Согласно этому приказу, места расположения средств автоматического непрерывного газового контроля и анализа с сигнализацией для контроля загазованности в рабочей зоне открытых наружных установок устанавливаются и обосновываются в проектной документации в соответствии с техни-

¹ Рукин М.В. Пожарная безопасность химически-опасных производств и объектов хранения. URL: <http://ervist.info/support/publikatsii/item/320-pozharnaya-bezopasnost-himicheski-opasnyh-proizvodstv-i-obektov-hraneniya.html> (дата обращения: 21.02.2021).

² Требования к установке сигнализаторов и газосигнализаторов, ТУ-газ-86. М., 1986. URL: <https://files.stroyinf.ru/Data1/9/9177/> (дата обращения: 16.02.2021).

³ Об утверждении федеральных норм и правил в области промышленной безопасности «Общие правила взрывобезопасности для взрывопожароопасных химических, нефтехимических и нефтеперерабатывающих производств»: Приказ от 15 декабря 2020 года № 533. URL: <http://docs.cntd.ru/document/573200380> (дата обращения: 16.02.2021).

ческими характеристиками средств (приборов), указанных в паспортах организации-изготовителя. То есть в соответствии с различными проектами технологических установок на НПЗ места расположения могут быть различны. Довольно важным является процесс технического обслуживания (ТО) приборов первого уровня информирования в автоматизированных системах управления технологическими процессами (АСУТП). ТО включает в себя некоторый комплекс мероприятий по приведению в готовность какого-либо оборудования. В данной работе будем рассматривать ТО средств автоматического газового контроля и анализа, а именно стационарных термохимических газосигнализаторов и их датчиков, установленных вокруг ОТУ. Под ОТУ будем понимать оборудование промышленных предприятий, размещаемое вне производственных зданий (на открытых площадках) [5].

Целью исследования является анализ процедуры ТО датчиков стационарных термохимических газосигнализаторов, установленных вокруг ОТУ НПЗ, и построение возможного математического описания оценки эффективности данной процедуры, зависящей от ряда групп параметров. Данная цель достигается путем решения ряда задач. Одна из них — обоснование выбора именно стационарных газосигнализаторов термохимического принципа действия, используемых в автоматизированных системах предотвращения предпожарных и взрывоопасных режимов для измерения дозврывоопасных концентраций горючих газов и паров, вероятность утечки которых на объектах НПЗ крайне высока. Также в работе уделяется внимание задачам анализа особенностей ТО датчиков газосигнализаторов и описания проблемы принципа размещения датчиков у источников потенциальных утечек, влияющих на процедуру ТО. Отдельной важной задачей является выявление нескольких групп факторов, влияющих на периодичность и длительность дисциплины ТО, которое при регламентном проведении не всегда учитывает реальный расход технического ресурса.

Теоретические основы

Определим теоретический смысл слова «дисциплина» относительно ТО стационарных термохимических газосигнализаторов. Любое ТО — это комплекс мероприятий по приведению в готовность определенного оборудования. В рассматриваемом случае — стационарных термохимических газосигнализаторов. При этом важен способ проведения этих мероприятий. Плановая форма их проведения определена и заложена в руководстве по эксплуатации (РЭ) прибора. Однако в действительности на определенном объекте переработки нефти существует большое количество новых параметров процесса ТО,

которые связаны с учетом новых обстоятельств [6]. Способы изменения, корректировок плановых мероприятий и будет составлять суть понятия «дисциплина ТО».

Рассмотрим, как можно моделировать дисциплину проведения работ внутри процесса ТО стационарных термохимических газосигнализаторов. Дисциплину ТО формирует план и его изменения. Обычно план составляется на основе цели, функции, характеризующей ее достижение, и используемых в ней параметров. Так как стационарные термохимические газосигнализаторы являются сложными техническими системами, целевые функции для различных по целям моделей дисциплин ТО даже для одного элемента такого оборудования будут содержать достаточно большое число параметров. Разбив их на группы, можно упростить целевые функции, не сильно потеряв при этом в точности ее оценки достижения поставленной цели.

Будем считать, что проектные работы по определению мест установки и топологии объекта НПЗ выполнены на высоком уровне, все приборы установлены в полном соответствии с нормативно-технической документацией и в полном соответствии с требованиями к ПБ пожаровзрывоопасных объектов [7]. Открытые площадки, вокруг которых они установлены, не имеют специфических особенностей, при которых могут быть исключены воздействия на чувствительные элементы (ЧЭ) термохимических датчиков определенных погодных условий и агрессивных факторов среды [8].

Существуют различные классификации газосигнализаторов [8, 9]. По конструктивному исполнению различают стационарные и переносные приборы. Стационарные устанавливаются на элементах контроля объекта, а переносные используются персоналом для контроля среды. Переносные приборы находятся в руках человека, который, используя свой опыт, может оперативно действовать для предотвращения опасной ситуации. Стационарные газосигнализаторы контролируют участок местности на объектах НПЗ. Часто удалены от персонала и предназначены для работы в агрессивных с точки зрения ПБ средах в автоматическом режиме. В данной работе рассматриваются именно стационарные газосигнализаторы.

Также газосигнализаторы классифицируют в соответствии с физическими методами анализа. В этой группе приборов различают термохимические, тепловые, электрохимические, оптические, хроматографические, фотоколориметрические газосигнализаторы. Учитывая большое количество моделей и марок приборов и разницу в условиях их установки и эксплуатации в соответствии с климатом местности, где располагается тот или иной объект НПЗ, выберем одну

из применяемых в настоящее время моделей стационарного газосигнализатора. Одним из важных параметров отбора является стоимость, так как существует потребность использования на объектах НПЗ большого количества таких приборов. Вопрос экономии средств всегда актуален. Термохимические приборы наиболее приемлемы по данному параметру [10, 11]. Среди многих газосигнализаторов, применяемых для определения горючих паров или газов, термохимический метод получил наибольшее распространение в мировой практике [12]. В работе [13] при описании структуры автоматизированной системы управления противопожарной защитой нефтеперерабатывающих производств (на примере МНПЗ) для контроля аварийной загазованности на открытых технологических площадках рекомендовано использовать стационарные термохимические многоканальные газосигнализаторы, а именно СТМ-20 (сегодня заводом ФГУП СПО «Аналитприбор» выпускаются усовершенствованные модели). Авторы [14, 15] утверждают, что термохимический метод определения концентрации горючих газов имеет наибольшее распространение в промышленности. Также целесообразность использования газосигнализаторов такого типа для контроля загазованности на объектах нефтепереработки приведена в [16]. Кроме того, согласно технической документации, например⁴, подобные приборы способны контролировать одновременно несколько десятков различных горючих составов, образующих газо- и паровоздушные смеси.

Полученные сведения позволяют сделать выбор (для целей исследования) именно в пользу термохимических газосигнализаторов, работающих по принципу определения энергии окисляемого ими газа с помощью катализатора. При этом можно выделить ряд недостатков: небольшой срок службы, измерение наличия целевого газа только в присутствии кислорода, необходимость частой калибровки нуля и пороговых значений, высокая вероятность выхода из строя в связи с перенасыщением определяемым газом, а также низкая чувствительность и быстрое действие [17–19]. Далее для исследования будем использовать модель СТМ-10.

Для привязки разрабатываемой модели к реальным условиям эксплуатации можно рассматривать Московский нефтеперерабатывающий завод. Практика работы служб завода показывает, что вокруг ОТУ установлены оптические, электрохимические, термохимические газосигнализаторы. Среди термохимических анализаторов распространена выбранная нами модель СТМ-10. Их датчики размещены соглас-

но требованиям² и рекомендациям [13]. ТО выполняется в соответствии с руководством по эксплуатации³.

Применяемая на Московском НПЗ автоматизированная система управления противопожарной защитой обычно содержит следующие типы датчиков: пожарные извещатели, соединенные с преобразователем сигналов, датчики параметров окружающей среды, датчики метеорологических параметров, датчики параметров технологического оборудования, датчики параметров технологического процесса, датчики параметров технического состояния установок пожаротушения, подключенные через преобразователи сигналов к соответствующим входам вычислительного устройства⁵. Указанные приборы служат входными устройствами для важной в рамках текущего исследования системы оповещения о пожаре. Выносные датчики (ВД) газосигнализаторов выбранной модели СТМ-10 должны входить в нее в качестве датчиков параметров технологического процесса. Процесс обеспечения ПБ является одним из технологических процессов на любом объекте переработки нефти и газа. Это подтверждается описанием систем, приводимых в [13].

Приведенное описание говорит о том, что дисциплина ТО как один из технологических процессов (подпроцесса процесса обеспечения ПБ на объектах НПЗ), будет зависеть, как минимум, от следующего ряда факторов: параметров окружающей среды, метеорологических параметров, параметров технологического оборудования. Кроме того, параметры технологического процесса на объектах переработки нефти и газа будут отдельной категорией параметров, влияющих на дисциплину ТО.

Известно, что при ведении работ по переработке нефти на ОТУ в зависимости от состава сырья существуют различные варианты выделения негативно влияющих на ЧЭ термохимических датчиков агрессивных веществ (или каталитических ядов). Они обуславливают снижение интервалов калибровки или ускоренный выход из строя ЧЭ ВД. Помимо этого, на снижение этих интервалов могут влиять погодные условия [20]. Например, чрезмерная влажность воздуха (туман или выпадение росы) может приводить к необходимости слива конденсата. А при выделении различных «производственных» паров может возникнуть необходимость экстренной чистки фильтровального стакана⁴. В указанных случаях мероприятия по калибровке необходимо проводить внеплановым образом. При этом данные изменения в дисциплине ТО не будут зависеть от модели и марки термохими-

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: 02.03.2021).

⁵ Пат. РФ № 2666339, МПК А62С 37/00. Автоматизированная система взрывопожарной безопасности на основе газового контроля / Лукьянченко А.А., Свиридок Е.В., Севрюков И.Т., Бедило М.В., Соколов А.В. № 2017138457, заяв. 03.11.2017 ; опубл. 06.09.2018. Бюл. № 25.

ческого газосигнализатора. Но для более конкретного рассмотрения деталей процесса ТО, для которого будет разрабатываться дисциплина, остановимся на модели СТМ-10, и, отталкиваясь от нее, будем делать дальнейшие обобщения.

Установленная в⁴ дисциплина проведения ТО СТМ-10 предусматривает ежегодную поверку ВД и их калибровку в течение не более чем 45 суток (1080 часов) по поверочной газовой смеси (ПГС). Вместе с тем воздействие на них ряда факторов среды приводит к необходимости корректировки прежде всего сроков калибровки. А если это так, то величина коэффициента преобразования для ЧЭ растет быстрее. Учитывая это, разработчики прибора рекомендуют службам эксплуатации проводить замену ЧЭ на основе многолетнего опыта эксплуатации термохимических датчиков.

Результаты исследования

Будем рассматривать дисциплину ТО одного из датчиков в качестве функции групп параметров, которые определяют необходимость проведения определенных мероприятий для поддержания ВД СТМ-10 в требуемом документацией состоянии. В качестве значений данной функции могут выступать цели, обозначенные выше обобщенно. Такими целями могут быть:

- нормированная надежность подсистемы оповещения о пожаре, определяемая как отношение числа потенциально готовых к использованию в соответствии с нормативно-технической документацией датчиков к их общему числу;
- количество человеко-часов, необходимое для приведения данной системы в требуемое состояние;
- общие финансовые затраты, необходимые для поддержания единицы оборудования в готовом состоянии.

Для технологического процесса обеспечения ПБ наиболее важной является первая цель. Менее важной — вторая, а затем третья.

По сути, дисциплина ТО, позволяющая определять датчики, для которых необходимо проведение мероприятий ТО в связи с тем, что произошли какие-то неблагоприятные для их устойчивой эксплуатации события, представляет собой набор действий персонала по ее осуществлению. Для выбора нужной альтернативы в дисциплине ТО или сценарии проведения мероприятий можно использовать критерий ее оценки, основанный на целевых функциях, отражающих зависимости от каждой из групп перечисленных параметров.

В этом случае для одного элемента оборудования (ВД) можно записать:

$$D_i = \{F_{1i}, F_{2i}, F_{3i}, F_{4i}\}, i = \{1, 2, 3\}, \quad (1)$$

где i — номер цели функции для дисциплины ТО:

1 — нормированная надежная работа датчика внутри подсистемы оповещения о пожаре;

2 — количество человеко-часов, необходимое для приведения данной системы в требуемое состояние;

3 — общие финансовые затраты, необходимые для поддержания единицы оборудования в готовом состоянии;

F_{1i} — целевая функция, основанная на группе специфических параметров данной модели ЧЭ стационарного термохимического газосигнализатора;

F_{2i} — целевая функция, основанная на группе климатических параметров и топологии местности, где находится объект НПЗ;

F_{3i} — целевая функция, основанная на группе параметров работы персонала;

F_{4i} — целевая функция, основанная на группе прочих параметров.

Специфические параметры заданной модели ЧЭ стационарного термохимического газосигнализатора связаны с составом заложенного в него реагента. Описание его поведения при воздействии различных факторов среды, а также данные по его «износу» фиксируются производителем оборудования в РЭ, а эксплуатирующей организацией — во внутренних документах.

Климатические особенности и топология местности, в которой находится объект НПЗ, определяют базовую линию эксплуатации ЧЭ на конкретном объекте. Они могут влиять на количество калибровок и срок эксплуатации ЧЭ и должны в случаях, когда производственный процесс на определенном объекте НПЗ проходит в жестких для ЧЭ условиях, рассчитываться статистически. Также большую роль играют условия проверок и калибровок по ПГС, которые во многом зависят от температуры и влажности. Топология в меньшей степени влияет на условия эксплуатации и проверок ЧЭ, но фактически определяет их количество, регламентированное для установки вокруг ОТУ на объекте НПЗ.

Параметры работы персонала влияют на количество нормочасов, необходимое для калибровки и поверки устанавливаемых на объектах ЧЭ газосигнализаторов. Благодаря их учету можно рассчитать количество и сроки мероприятий ТО.

К прочим параметрам можно отнести такие особенности ЧЭ, как вариант исполнения, электрическое питание, выходная мощность, допустимое сопротивление нагрузки и т.п. Логично было бы дополнить данный набор параметров еще одним, основанным на форме конкретной открытой площадки, вокруг которой установлены стационарные приборы задан-

ной модели. Форма площадки может влиять на число установленных ВД.

Все перечисленные в (1) измерения вектора D_i представляют собой интегральные величины, которые могут быть выражены либо некоторыми действительными, либо нормированными величинами.

В случае необходимости получения интегрального критерия эффективности в дисциплину ТО следует включить все три перечисленных вектора из (1). Тогда интегральные оценки эффективности дисциплины ТО можно записать в виде прямоугольной матрицы

$$D_{\text{ТО}} = \begin{pmatrix} F_{11}, & F_{21}, & F_{31}, & F_{41} \\ F_{12}, & F_{22}, & F_{32}, & F_{42} \\ F_{13}, & F_{23}, & F_{33}, & F_{43} \end{pmatrix}. \quad (2)$$

Результатом применения такого подхода может быть интегральная целевая функция по всем трем целям. Интегральный критерий в этом случае можно получить в виде свертки матрицы. В случае, когда значения ее элементов выражены действительными числами, это может быть сумма элементов по строкам и столбцам

$$D_{\text{ТО}} = \sum_{i=1}^3 \sum_{j=1}^4 F_{ij}, \quad (3)$$

где F_{ij} — указанные выше факторы.

Дисциплина ТО представляет собой дискретно изменяемый процесс, состоящий из последовательности операций. Дискретное изменение процесса связано с появлением и регистрацией субъектом управления опасных событий, которые могут привести к снижению эффективности работы систем раннего обнаружения пожара. Как описано в [21], снижение эффективности подсистемы АСУТП по контролю уровня ПБ, а также их восстановление на объекте НПЗ может быть описано в виде двух встречно идущих подпроцессов: разрушительного и созидательного. Первый представляет собой последовательность опасных событий. Второй — последовательность управляющих воздействий и вызванных ими событий по восстановлению системы, которой управляет субъект управления. Процесс

ТО газосигнализаторов представляет собой составную часть созидательного (восстановительного) подпроцесса.

С учетом обозначенной цели исследования в данном разделе работы описан некоторый подход к математическому моделированию оценки эффективности ТО в общем виде. Он может быть применен для любого отдельно взятого датчика вокруг любой ОТУ НПЗ с возможностью выбора требуемого количества параметров в каждой из обозначенной группы параметров, влияющих на глубину оценки эффективности ТО. Данный выбор определяется на отдельном объекте НПЗ соответствующим закрепленным лицом, принимающим решения. В последующих работах при углублении описания процедуры моделирования ТО газосигнализаторов, устанавливаемых вокруг ОТУ на объектах НПЗ, будет проведена числовая расчетная оценка зависимости количества выносных датчиков от различных форм ОТУ НПЗ (прямоугольная, произвольный многоугольник, произвольная).

Выводы

В работе рассмотрели подход к моделированию дисциплины проведения работ в процессе ТО стационарных термохимических газосигнализаторов, установленных вокруг ОТУ НПЗ. Формирующий дисциплину ТО возможный план мероприятий выражен целями, функциями, характеризующими их достижение, а также используемыми в них параметрами.

Для построения некоторой базовой линии процесса ТО газосигнализаторов, устанавливаемых вокруг ОТУ на объектах НПЗ, необходимо рассмотреть их пространственное расположение, которое позволит посчитать их количество в конкретном случае в зависимости от периметра открытой установки. В этом смысле наиболее важными представляются два параметра: число датчиков в зависимости от величины периметра установки и регламентное время их ТО. Расчет регламентного времени проведения мероприятий ТО датчиков газосигнализаторов на объектах НПЗ ремонтными бригадами, состав которых известен, проведен в работе [22]. В следующих работах рассчитаем число ВД в зависимости от периметра открытой установки.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Milov V.R., Suslov B.A., Kryukov O.V. Intellectual management decision support in gas industry // Automation and Remote Control. 2011. Vol. 72. Issue 5. Pp. 1095–1101. DOI: 10.1134/S0005117911050183
2. De Cillis F., Inderst F., Pascucci F., Setola R., Tesei M., Bragatto B.A. Improving the safety and the operational efficiency of emergency operators via on field situational awareness // Chemical Engineering Transactions. 2016. Vol. 53. Pp. 331–336. DOI: 10.3303/CET1653056

3. *Salameh H.B., Dhainat M., Benkhelifa E.* A survey on wireless sensor network-based IoT designs for gas leakage detection and fire-fighting applications // *Jordanian Journal of Computers and Information Technology*. 2019. Vol. 5. Issue 2. Pp. 60–72. DOI: 10.5455/jjcit.71-1550235278
4. *Топольский Н.Г., Самарин И.В., Строгонов А.Ю.* Методика оценки готовности к работе оборудования АСПББ 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
5. *Прохоров А.М.* Большая советская энциклопедия. 3-е изд. М. : Сов. Энциклопедия, 1969.
6. *Namuduri S., Narayanan B.N., Davuluru V.S.P., Burton L., Bhansali S.* Deep learning methods for sensor based predictive maintenance and future perspectives for electrochemical sensors // *Journal of The Electrochemical Society*. 2020. Vol. 167. Issue 3. DOI: 10.1149/1945-7111/ab67a8
7. *Zhang Y., Zhang M., Qian C.* System dynamics analysis for petrochemical enterprise fire safety system // *Procedia Engineering*. 2018. Vol. 211. Pp. 1034–1042. DOI: 10.1016/j.proeng.2017.12.107
8. *Korotcenkov G.* Handbook of gas sensor materials. Vol. 1: Conventional Approaches. New York : Springer, 2013. 442 p. DOI: 10.1007/978-1-4614-7165-3
9. *Хаматдинова А.В., Смородова О.В.* Приборный контроль состояния газовой среды на предприятиях нефтепереработки // *Технологии технообезопасности*. 2015. № 4 (62). С. 325–331. URL: <https://elibrary.ru/item.asp?id=25846445>
10. *Lewis A.C., Lee J.D., Edwards P.M., Shaw M.D., Evans M.J., Moller S.J. et al.* Evaluating the performance of low cost chemical sensors for air pollution research // *Faraday discussions*. 2016. Vol. 189. Pp. 85–103. DOI: 10.1039/C5FD000201J
11. *Szulczyński B., Gębicki J.* Currently commercially available chemical sensors employed for detection of volatile organic compounds in outdoor and indoor air // *Environments*. 2017. Vol. 4. Issue 1. P. 21. DOI: 10.3390/environments4010021
12. *Храпский С.Ф., Стариков В.И., Рысев Д.В.* Производственная и пожарная автоматика. Омск : Изд-во ОмГТУ, 2013. 150 с.
13. *Федоров А.В.* Научные основы создания автоматизированной системы управления противопожарной защитой нефтеперерабатывающих производств. М. : Академия государственной противопожарной службы МВД России, 2000. 392 с.
14. *Фомин В.И., Федоров А.В., Лукьянченко А.А., Костюченков Д.К.* Автоматический аналитический контроль взрывоопасности воздушной среды промышленных объектов // *Пожаровзрывобезопасность/Fire and Explosion Safety*. 2004. Т. 13. № 4. С. 49–54. URL: <https://elibrary.ru/item.asp?id=18027450>
15. *Васьков Р.Е., Богач В.В.* О некоторых вопросах планирования мероприятий по локализации и ликвидации аварий // *Вестник Казанского технологического университета*. 2015. Т. 18. № 2. С. 428–429. URL: <https://elibrary.ru/item.asp?id=23006585>
16. *Френкель Б.А.* Промышленные анализаторы состава и свойств жидкостей и газов в процессах переработки нефти. М. : ЦНИИТЭнефтехим. 1995. 145 с.
17. *Афанасьев Д.С., Бардакова Е.А., Быстрыков Д.С.* Аналитический обзор датчиков летучих веществ для интернета вещей // *Информационные технологии и телекоммуникации*. 2016. Т. 4. № 4. С. 1–12. URL: <https://www.sut.ru/doci/nauka/review/20164/1-12.pdf>
18. *Мотин А.В., Вергазов И.Р., Чапанов Н.С., Федоренко В.В.* Анализ и выбор методов преобразования концентрации компонентов ракетного топлива в воздухе рабочих мест и окружающей среды // *Информационно-управляющие и измерительные системы*. 2018. С. 92–96. URL: <https://elibrary.ru/item.asp?id=37280335>
19. *Кондратьева О.Е., Росляков П.В.* Сравнительный анализ газоаналитических систем для проведения непрерывного мониторинга выбросов ТЭС // *Теплоэнергетика*. 2017. № 6. С. 48–62. DOI: 10.1134/S0040363617060029
20. *Sekhar P.K., Brosha E.L., Mukundan R., Garzon F.* Chemical sensors for environmental monitoring and homeland security // *Electrochemical Society Interface*. 2010. Vol. 19. Issue 4. Pp. 35–40. DOI: 10.1149/2.F04104if
21. *Самарин И.В., Крючков А.В., Строгонов А.Ю.* Модель оценки готовности термохимических газосигнализаторов // *Пожаровзрывобезопасность/Fire and Explosion Safety*. 2020. Т. 29. № 6. С. 61–74. DOI: 10.22227/PVB.2020.29.06.61-74
22. *Самарин И.В., Крючков А.В., Строгонов А.Ю.* Расчет времени и состава бригады для мероприятий калибровки термохимических датчиков на открытых установках НПЗ // *Автоматизация, телемеханизация и связь в нефтяной промышленности*. 2020. № 12. С. 38–43.

REFERENCES

1. Milov V.R., Suslov B.A., Kryukov O.V. Intellectual management decision support in gas industry. *Automation and Remote Control*. 2011; 72(5):1095-1101. DOI: 10.1134/S0005117911050183
2. De Cillis F., Inderst F., Pascucci F., Setola R., Tesei M., Bragatto B.A. Improving the Safety and the Operational Efficiency of Emergency Operators via On Field Situational Awareness. *Chemical Engineering Transactions*. 2016; 53:331-336. DOI: 10.3303/CET1653056
3. Salameh H.B., Dhainat M., Benkhelifa E. A survey on wireless sensor network-based IoT designs for gas leakage detection and fire-fighting applications. *Jordanian Journal of Computers and Information Technology*. 2019; 5(02):60-72. DOI: 10.5455/jjcit.71-1550235278
4. Topolskiy N.G., Samarin I.V., Stroganov A.Yu. Operating readiness evaluation method of first level information distribution AFES equipment at facilities of fuel and energy complex in special conditions. *Pozharovzryvobezopasnost/Fire and Explosion Safety*. 2019; 28(1):35-46. DOI: 10.18322/PVB.2019.28.01.35-46 (rus).
5. Prokhorov A.M. *Great Soviet Encyclopedia*. 3rd ed. Moscow, Sovetskaya Entsiklopedia, 1969. (rus).
6. Namuduri S., Narayanan B.N., Davuluru V.S.P., Burton L., Bhansali S. Deep learning methods for sensor based predictive maintenance and future perspectives for electrochemical sensors. *Journal of the Electrochemical Society*. 2020; 167(3). DOI: 10.1149/1945-7111/ab67a8
7. Zhang Y., Zhang M., Qian C. System dynamics analysis for petrochemical enterprise fire safety system. *Procedia Engineering*. 2018; 211:1034-1042. DOI: 10.1016/j.proeng.2017.12.107
8. Korotcenkov G. Handbook of gas sensor materials. *Volume 1: Conventional Approaches*. New York, Springer, 2013; 442. DOI: 10.1007/978-1-4614-7165-3
9. Khamatdinova A.V., Smorodova O.V. The instrumental control of gas environment state on refining plants. *Technology of Technosphere Safety*. 2015; 4(62):325-331. URL: <https://elibrary.ru/item.asp?id=25846445> (rus).
10. Lewis A.C., Lee J.D., Edwards P.M., Shaw M.D., Evans M.J., Moller S.J. et al. Evaluating the performance of low cost chemical sensors for air pollution research. *Faraday discussions*. 2016; 189:85-103. DOI: 10.1039/C5FD00201J
11. Szulczyński B., Gębicki J. Currently commercially available chemical sensors employed for detection of volatile organic compounds in outdoor and indoor air. *Environments*. 2017; 4(1):21. DOI: 10.3390/environments4010021
12. Khrapsky S.F., Starikov V.I., Rysev D.V. *Industrial and fire automation systems*. Omsk, Omsk State Technical University Publ., 2013; 150. (rus).
13. Fedorov A.V. *Scientific bases of creation of the automated control system of fire protection of oil refineries*. Moscow, State Fire Academy of the Ministry of Internal Affairs of Russia Publ., 2000; 392. (rus).
14. Fomin V.I., Fedorov A.V., Lukyanchenko A.A., Kostyuchenkov D.K. An automatic analytical control of explosion hazard of air medium of industrial objects. *Pozharovzryvobezopasnost/Fire and Explosion Safety*. 2004; 13(4): 49-54. URL: <https://elibrary.ru/item.asp?id=18027450> (rus).
15. Vaskov R.E., Bogach V.V. About some questions of planning of actions for localization and elimination of accidents. *Bulletin of Kazan technological University*. 2015; 18(2): 428-429. URL: <https://elibrary.ru/item.asp?id=23006585> (rus).
16. Frankel B.A. *Industrial analyzers of the composition and properties of liquids and gases in oil refining processes*. Moscow, TSNIITneftekhim, 1995; 145. (rus).
17. Afanasiev D.S., Bardakova E.A., Bystryakov D.S. Analytical review sensors of volatiles for the internet of things. *Telecom IT*. 2016; 4(4):1-12. URL: <https://www.sut.ru/doci/nauka/review/20164/1-12.pdf> (rus).
18. Motin A.V., Vergazov I.R., Chapanov N.S., Fedorenko V.V. Analysis and selection of methods for converting the concentration of rocket fuel components in the air of workplaces and the environment. *Information and control and measurement systems*. 2018; 92-96. URL: <https://elibrary.ru/item.asp?id=37280335> (rus).
19. Kondratova O.E., Roslyakov P.V. Comparative study of gas-analyzing systems designed for continuous monitoring of TPP emissions. *Thermal Engineering*. 2017; 6:437-449. DOI: 10.1134/S0040601517060027 (rus).
20. Sekhar P.K., Brosha E.L., Mukundan R., Garzon F. Chemical sensors for environmental monitoring and homeland security. *Electrochemical Society Interface*. 2010; 19(4):35-40. DOI: 10.1149/2.F04104if
21. Samarin I.V., Kryuchkov A.V., Stroganov A.Yu. Thermochemical gas analyzer readiness assessment model. *Pozharovzryvobezopasnost/Fire and Explosion Safety*. 2020; 29(6):61-74. DOI: 10.22227/PVB.2020.29.06.61-74 (rus).

22. Samarin I.V., Kryuchkov A.V., Strogonov A.Yu. Calculation of time and team composition for thermochemical detectors calibration installed around open refinery plants. *Automation, telemechanization and communication in oil industry*. 2020; 12: 38-43. DOI: 10.33285/0132-2222-2020-12(569)-38-43 (rus).

Поступила 19.12.2021, после доработки 13.01.2022; принята к публикации 01.02.2022
Received December 19, 2021; Received in revised form January 13, 2022; Accepted February 1, 2022

Информация об авторах

САМАРИН Илья Вадимович, канд. техн. наук, доцент, доцент 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: 867674; ORCID: 0000-0003-2430-5311; e-mail: ivs@gubkin.ru

КРЮЧКОВ Алексей Вячеславович, канд. техн. наук, 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: hook66@list.ru

СТРОГОНОВ Андрей Юрьевич, аспирант 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

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

Information about the authors

Ilya V. SAMARIN, Cand. Sci. (Eng.), Docent, Associate Professor of Department of Automation of Technological Processes, National University of Oil and Gas "Gubkin University", Leninskiy Avenue, 65, Bldg. 1, Moscow, 119991, Russian Federation; ID RISC: 867674; ORCID: 0000-0003-2430-5311; e-mail: ivs@gubkin.ru

Alexey V. KRYUCHKOV, Cand. Sci. (Eng.), Associate Professor of Department of Integrated Security of Critical Facilities, National University of Oil and Gas "Gubkin University", Leninskiy Avenue, 65, Bldg. 1, Moscow, 119991, Russian Federation; ID RISC: 1047095; ORCID: 0000-0002-5665-7058; e-mail: hook66@list.ru

Andrey Yu. STROGONOV, Graduate Student of Department of Automation of Technological Processes, National University of Oil and Gas "Gubkin University", Leninskiy Avenue, 65, Bldg. 1, Moscow, 119991, Russian Federation; ID RISC: 936562; ORCID: 0000-0001-7994-5987; e-mail: strogonov.a@gubkin.ru

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

ПОЖАРОВЗРЫВОБЕЗОПАСНОСТЬ/FIRE AND EXPLOSION SAFETY. 2022. Т. 31. № 1. С. 49–64
POZHAROVZRYVOBEZOPASNOST/FIRE AND EXPLOSION SAFETY. 2022; 31(1):49-64

НАУЧНАЯ СТАТЬЯ/RESEARCH PAPER

УДК 614.842.8

<https://doi.org/10.22227/0869-7493.2022.31.01.49-64>

Об оценке состояния комплексной безопасности на предприятиях нефтегазового комплекса России

Евгений Владимирович Гвоздев✉

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

АННОТАЦИЯ

Введение. В статье представлено описание выбора метода анализа иерархий и попарных сравнений (далее — МАИ), ставшего основой содержания методики оценки комплексной безопасности предприятия, применение которой обеспечивает преобразование входной информации, поступающей в виде характеристического описания оцениваемого мероприятия в выходной результат оценки, имеющий весовое численное значение.

Цели и задачи. Основная цель статьи — получить результат оцениваемых мероприятий, входящих в содержание чек-листов (листов контроля) как по промышленной, так и по пожарной безопасности, относящихся к комплексной безопасности предприятия. На основе попарного сравнения факторов и альтернатив с помощью выбранного МАИ представляется возможность определить для каждого исследуемого элемента показатели локальных и глобальных приоритетов. Весовые коэффициенты, полученные в виде локальных приоритетов, относятся к проверяемым мероприятиям, а глобальные приоритеты имеют непосредственное отношение к службам (структурным подразделениям), обеспечивающим устойчивое функционирование комплексной безопасности предприятия.

Методы. Представлено обоснование в выборе МАИ, позволяющее детализировать показатели влияния факторов и разбивать их на составляющие. На этапе синтеза полученных аналитических результатов с помощью МАИ предложено проводить проверку полученных экспертным путем результатов через определение показателя отношения согласованности между экспертами, подтверждающего получение адекватного результата.

Результаты. Вероятность влияния анализируемых опасностей, имеющих отношение к авариям и пожарам на рассматриваемых предприятиях, оценивалась как функционал причин их возникновения в течение рассматриваемого периода 7 лет. В статье представлены результаты расчетов в получении коэффициентов связи, воздействия и влияния специалистов служб (структурных подразделений) на обеспечиваемые подсистемы промышленной и пожарной безопасности, относящиеся к комплексной безопасности предприятия. Представлены результаты внесения поправочного коэффициента g , зависимость которого выражается в итоговых показателях ущерба, измеряемого в экономических (рублевых) и социальных (человеческих) потерях.

Обсуждение. В статье акцентируется внимание на том, что устойчивое функционирование промышленных предприятий зависит от обеспечения требуемого запаса надежности функционирования комплексной безопасности предприятия, поддержание которой на требуемом уровне обеспечивается ресурсом (финансовыми и материальными средствами, объемом времени, предназначенным для устранения выявленных отклонений персоналом, выполняющим трудовые функции, и т.д.). Учитывая, что выделяемый ресурс для обеспечения комплексной безопасности предприятия ограничен, его недостаточно для удовлетворения всех запросов, поступающих от руководителей служб (отделов), требуется научная проработка в адресном его обеспечении тех мероприятий, которые имеют высокий рисковый показатель.

Выводы. Использование методики оценки состояния комплексной безопасности на предприятиях нефтегазового комплекса России позволяет перевести систему управления рассматриваемыми предприятиями на новый качественный уровень.

Ключевые слова: курирующая служба; оценка влияния; локальный вектор приоритета; глобальный вектор приоритета; ресурсное обеспечение; входо-выходные характеристики

Для цитирования: Гвоздев Е.В. Об оценке состояния комплексной безопасности на предприятиях нефтегазового комплекса России // Пожаровзрывобезопасность/Fire and Explosion Safety. 2022. Т. 31. № 1. С. 49–64. DOI: 10.22227/0869-7493.2022.31.01.49-64

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

The assessment of the integrated safety of Russian oil and gas enterprises

Evgeniy V. Gvozdev✉

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

ABSTRACT

Introduction. The article addresses the choice of a method used to analyze hierarchies and pairwise comparisons (hereinafter — MAH), that serve as a framework for an integrated corporate safety assessment methodology. Its application ensures the transformation of input information, obtained in the form of a characteristic description of an assessed event, into the resulting assessment that has a weighted numerical value.

Goals and objectives. The main purpose of the article is to obtain an assessment result in respect of the actions that are added to industrial and fire safety checklists applied to assure the integrated safety of an enterprise. A selected MAH is used to make pairwise comparisons of factors and alternatives. Values of local and global priorities can be determined for each element under study. Weighted coefficients, obtained in the form of local priorities, are related to the activities being checked, while global priorities are directly related to the services (structural units) that ensure the sustainable integrated security of an enterprise.

Methods. The authors provide a rationale for the choice of MAH, which allows itemizing the values demonstrating the intensity of influence of factors and break them down into components. At the stage of synthesizing the obtained analytical results with the help of MAH, the results obtained by expertise must be verified by determining the value of the expert consistency ratio to confirm the adequacy of the obtained result.

Results. The probability of influence of analyzed hazards, related to accidents and fires at the enterprises under consideration, was assessed as a function of their causes during the 7-year period under review. The article presents calculated coefficients of communication, impacts and influence made by specialists employed with respective services (structural units) on the industrial and fire safety subsystems that encompassed the integrated safety of an enterprise. The results of introducing correction factor g , whose dependence is expressed by final indicators of damage measured in economic (ruble) and social (human) losses, are presented.

Discussion. The article focuses on the fact that the sustainable operation of industrial enterprises depends on the reliability margin of integrated corporate safety, the maintenance of which requires particular resources (financial, material resources, as well as the time, needed for the personnel to eliminate any identified deviations, etc.). Given that the resources focused on the integrated safety assurance are limited, they cannot meet all requests made by the heads of services (departments), while highly risky targeted activities need more research.

Conclusions. The application of the methodology for assessing the integrated security of Russian oil and gas enterprises allows taking their management systems to a new qualitative level.

Keywords: supervisory service; impact assessment; local priority vector; global priority vector; resource provision; input-output characteristics

For citation: Gvozdev E.V. The assessment of the integrated safety of Russian oil and gas enterprises. *Pozharovzryvobezopasnost/Fire and Explosion Safety*. 2022; 31(1):49-64. DOI: 10.22227/0869-7493.2022.31.01.49-64 (rus).

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

Введение

Период создания, развития и совершенствования комплексной безопасности (далее — КБ) объектов защиты техносферы как науки охватывает сорок с лишним лет. Техногенные катастрофы последних десятилетий XX и начала XXI веков, возникшие на уникальных объектах техносферы: (на химическом комплексе Бхопал (Индия), на атомных электростанциях ТМА (США), ЧАЭС (СССР), на атомных подводных лодках «Трешер» (США), «Комсомолец» (СССР), на ракетных комплексах «Челленджер», «Колумбия» (США) и Н1 (СССР), на мощных энергетических установках (Канада — США), на трубопроводных системах и морских плат-

формах (Аляска — США — Норвегия), на двух пассажирских поездах под Уфой, на летательных аппаратах гражданского и военного назначения (США, СССР, Франция), на судах и танкерах (Эстония, Япония, СССР), разрушения промышленных и гражданских зданий при землетрясениях (Мексика, Иран, Спитак — СССР), уносили сотни и тысячи человеческих жизней, а увечья получали сотни тысяч человек. Экономический ущерб от этих катастроф достигал десятков и сотен миллиардов долларов. Только в последние годы возникшая экологическая катастрофа федерального значения, которая произошла 29 мая 2020 года при разгерметизации емкости для хранения дизельного топлива для ТЭЦ-3 г. Но-

рильска (район Кайеркан), создала угрозу для экосистемы Северного Ледовитого океана [1–3].

Актуальность темы, представленной для рассмотрения в статье, заключается в наличии следующих противоречий:

1. С одной стороны, для поддержания на требуемом уровне КБ, созданной на предприятии, выделяется существенный объем ресурсного обеспечения.

2. С другой стороны, в подсистемах, входящих в содержание КБ предприятий, возникают опасности техногенного характера, в том числе из-за следующих проблем:

- связанных с наличием пробелов при определении причинно-следственной связи для тех опасностей, которые в виде вторичных воздействующих факторов, рассматриваемых как чрезвычайные ситуации (далее — ЧС), приносят существенный ущерб персоналу, оборудованию и имуществу;
- связанных с отсутствием методики оценки состояния КБ предприятий, что позволяет говорить о возможном нерациональном распределении ресурса, выделяемого для обеспечения отдельных ведомственных (отраслевых) направлений.

Научная проработка и решение представленной проблемы позволит минимизировать условия возникновения опасностей, перевести систему управления КБ предприятий на новый качественный уровень.

Основная цель статьи — получить результат оцениваемых мероприятий в виде весовых показателей риска, что позволит пронормировать каждое мероприятие, входящее в содержание чек-листа (листа контроля) как по промышленной (далее — ПрБ), так и по пожарной безопасности (далее — ПБ), которые входят в содержание КБ предприятия.

Решение задач, направленных на получение результатов весовых коэффициентов в виде локальных приоритетов, будут отнесены к проверяемому мероприятию, глобальные же приоритеты будут иметь непосредственное отношение к обеспечивающим КБ предприятия службам (структурным подразделениям).

Анализ исследований, связанных с оценкой влияния на комплексную безопасность работающего персонала

В последнее время направленность фундаментальных, системных и прикладных исследований в области анализа и управления КБ объектов защиты техносферы с учетом накопленного опыта постановки и решения этой проблемы приобретает уже новое значение в связи с переходом с 2018 года на принципиально новый уровень решения вопросов научного анализа, нормирования, регулирования и обеспечения техносферной безопасности и защиты

от чрезвычайных ситуаций в соответствии с Указами Президента Российской Федерации об основах государственной политики в этих областях на период до 2030 года и дальнейшую перспективу. Например, в январе 2018 года был принят к исполнению один из документов стратегического планирования «Основы государственной политики в области защиты населения и территорий от ЧС природного и техногенного характера на период до 2030 года», который утвержден Указом Президента России, в содержании которого определена главная цель по реализации данного направления безопасности — «обеспечение устойчивого социально-экономического развития РФ, а также приемлемого уровня безопасности жизнедеятельности населения в чрезвычайных ситуациях».

В настоящее время членом-корреспондентом Российской Академии наук Махутовым Николаем Андреевичем представлена сформулированная постановка задач в сфере КБ государства в виде принятия в качестве директивной и правовой базы для дальнейшей работы новых основополагающих документов — федеральных законов, концепций, стратегий, требования которых направлены на решение следующих стратегических приоритетов: социально-экономического развития и обеспечения национальной безопасности. Представленные приоритетные целевые установки уже начинают включать в себя большой спектр для проведения новых направлений исследований и разработок [4, 5].

В проведенных ранее исследованиях [6–8] отмечено, что созданные на предприятии службы (структурные подразделения) по обеспечению ведомственных (отраслевых) направлений, входящих в КБ предприятия, являются проводниками в исполнении утвержденных требований (НПА и НД), а для обеспечения устойчивого функционирования КБ предприятий они нуждаются в качественном организационном взаимодействии между собой.

Анализ исследований, связанных с возникновением опасностей на предприятиях из-за влияния работающего персонала служб (структурных подразделений) на обеспечивающие ими подсистемы безопасности, входящие в КБ предприятия, позволил сделать выводы, что в данном направлении уже проведены серьезные исследования [9–11]. Результаты проведения исследований позволили сформировать укрупненные группы в виде следующих исследовательских направлений, к ним относятся:

1. *Направление*, в содержании которого рассматривается операторная деятельность персонала предприятия, с точки зрения его взаимодействия с процессом производства через различные автоматизированные технические системы;

2. *Направление*, в содержании которого рассматриваются функциональные и физиологические воз-

возможности специалиста (работающего персонала) при штатных и аварийных ситуациях;

3. *Направление*, в содержании которого рассматривается требуемая штатная численность и уровень подготовки специалиста (работающего персонала), оценки его готовности к выполнению трудовых функций;

4. *Направление*, в содержании которого рассматривается организация рабочего места специалиста (работающего персонала), т.е. формирование комфортного эргатического пространства.

5. *Направление*, в содержании которого рассматривается полнота и соответствие набора принятых к исполнению требований для безопасного функционирования ведомственных (отраслевых) подсистем, входящих в КБ предприятия.

Отличие выбранного нового исследовательского направления, представляемого автором статьи, заключается в том, что в нем впервые рассматривается человеческий фактор в виде влияния персонала служб (структурных подразделений) на ведомственные (отраслевые) подсистемы ПрБ и ПБ. Динамика последовательного нарастания событий, приводящих к различным видам реализованных опасностей (авария, пожар, нанесение увечья или гибель персонала), во многом зависит от влияния служб (структурных подразделений) на обеспечиваемые ими подсистемы ПрБ и ПБ, которые входят в содержание КБ предприятия [12–15].

Проводился анализ существующих методик (методических рекомендаций), которые изданы и утверж-

дены в ведомственных (отраслевых) подсистемах ПрБ и ПБ, которые используются на различных предприятиях. Установлен факт, что комплексная универсальная оценка состояния ПрБ и ПБ предприятий в настоящее время отсутствует [16]. Отмечается, что методы оценки, система показателей и объем необходимой информации обусловлены результатом анализа, уровнем подготовки решений и содержанием задач, которые реализуются в конкретных организационно-правовых и технико-экономических условиях. Несмотря на значительное число различных факторов, влияющих на текущее состояние с авариями и пожарами на предприятиях НГК России, в качестве выходных показателей моделей на практике в основном обрабатываются:

- показатели аварий и пожаров;
- количество пострадавших и погибших;
- значение материального ущерба;
- организационные и технические причины.

В статье дано соответствующее обоснование, что при проведении оценки состояния ПрБ и ПБ на предприятиях, кроме представленных заслуживающих внимания показателей, необходимо учитывать причины возникновения опасностей в случаях, когда возникшая опасность (авария или пожар) выходит за пределы допустимых значений запаса устойчивого функционирования отраслевой подсистемы, далее воздействует на взаимодействующие подсистемы [17, 18].

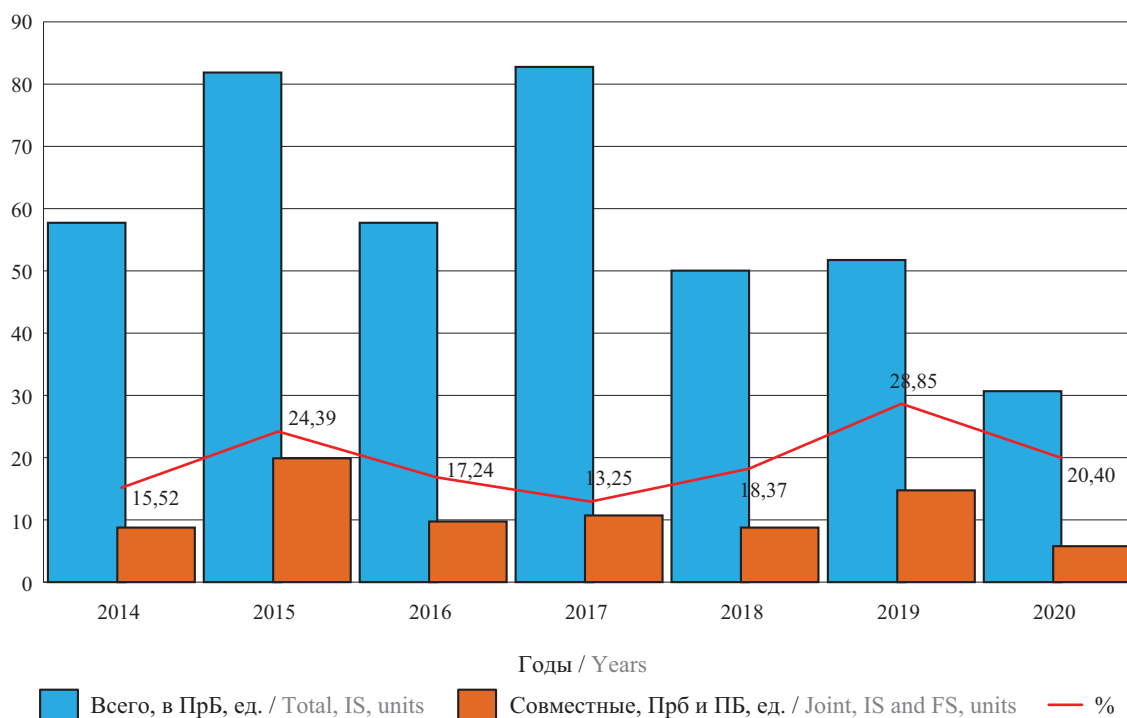


Рис. 1. Статистика совместных аварий и пожаров на предприятиях НГК России

Fig. 1. Statistics of joint accidents and fires at the OGK enterprises of Russia

Анализ статистики возникновения аварий и пожаров на предприятиях нефтегазового комплекса России

С целью проведения дальнейших исследований по определению причин возникновения совместных аварий и пожаров на предприятиях НГК России рассматривалась статистика совместных аварий и пожаров за период 2014–2020 гг., расследование которых проводилось по линии Ростехнадзора¹ и МЧС России² (рис. 1).

Сделаны выводы, что доля совместных опасностей составляет около 20 %, рассчитанный показатель по среднему годовому ущербу около 1,5 млрд руб. (почти 40 % от общего нанесенного ущерба), на долю таких опасностей приходится около 38 % пострадавшего и погибшего персонала от общего показателя [19].

Последовательность реализации этапов методики оценки состояния комплексной безопасности на предприятиях нефтегазового комплекса России

Дано описание порядка получения результатов входо-выходных характеристик, имеющих принадлежность к каждому этапу методики оценки состоя-

ния комплексной безопасности (далее — «Методика») на предприятии НГК России.

На 1-м этапе — (сбора исходных данных) осуществлялся сбор данных о количестве совместных аварий и пожаров, произошедших на предприятиях НГК России за период 2014–2020 гг. (см. рис. 3). Далее формировались сведения с наименованиями причин возникновения совместных аварий и пожаров на предприятиях НГК России, привязанных к кодам причин пожаров по приказу МЧС России от 24.12.2018 № 625³ (табл. 1).

Затем формировалась сводная таблица для аварий, возникших на предприятиях НГК России за период 2014–2020 гг. В колонке перед представлением отчета об аварии указывается наименование организации, ведомственная принадлежность, дата происшествия, место аварии, вид аварии:

1. Выбор наименования кода по пожарной безопасности (ПБ) (Приказ МЧС России от 24.12.2018 № 6253 (табл. 1).

2. Выбор совместных пожаров в ПБ и аварий в ПрБ, отнесенных к выбранному по ПБ коду.

3. Присвоение кода по уровню значимости (погибшие*, пострадавшие*, экономический ущерб).

4. Выборка из отчета причин аварий и их включение в соответствующие столбцы.

5. Для каждой включенной причины нахождение требований документа.

¹ Ростехнадзор. URL: <http://www.gosnadzor.ru/industrial/oil/lessons>

² О представлении карточек учета пожаров : Письмо от начальника ФГБУ ВНИИПО МЧС России № ИГ-117-2212-11-6 от 15.12.2020 и № ИГ-117-793-11-6 от 21.06.2021.

³ О формировании электронных баз данных учета пожаров и их последствий : Приказ МЧС России № 625 от 24.12.2018.

Таблица 1. Сведения с наименованиями причин возникновения совместных аварий и пожаров на предприятиях НГК России за период 2014–2020 гг.

Table 1. The list of causes of concurrent accidents and fires at Russian oil and gas enterprises in 2014–2020

Причина Reason	Наименование причины Name of the reason	Кол-во Quantity
3	Нарушение технологического регламента процесса производства Violation of technology regulations governing the production process	28
8	Прочие причины, связанные с неисправностью производственного оборудования, нарушение технологического процесса производства Other reasons related to the malfunction of production equipment, failure to comply with the production process	15
15	Самовозгорание веществ и материалов Spontaneous combustion of substances and materials	9
28	Прочие причины, не относящиеся ни к одной из групп Other reasons that do not belong to any of the groups	7
27	Неустановленные причины Unknown reasons	5
4	Разряд статического электричества Static electricity discharge	4
14	Взрывы Explosions	4

Причина Reason	Наименование причины Name of the reason	Кол-во Quantity
48	Прочие причины, связанные с нарушением правил устройства и эксплуатации газового оборудования Other reasons related to violation of the rules of installation and operation of gas equipment	3
2	Недостаток конструкции, изготовления и монтажа производственного оборудования A drawback of the construction, production and installation of production machinery	2
13	Нарушение правил пожарной безопасности при проведении электрогазосварочных работ Violation of fire safety rules during electric and gas welding works	2
23	Прочие причины, не относящиеся ни к одной из групп Other reasons that do not belong to any of the groups	2
25	Прочие причины, связанные с неосторожным обращением с огнем Other reasons related to careless handling of fire	2
30	Неисправность систем, механизмов и узлов транспортного средства Malfunction of systems, mechanisms and components of a transport vehicle	2
27	Неустановленные причины Unknown reasons	1
28	Прочие причины, не относящиеся ни к одной из групп Other reasons that do not belong to any of the groups	1
5	Разрушение движущихся узлов, деталей, попадание в движущиеся механизмы посторонних предметов Destruction of moving components, parts, foreign objects getting into moving mechanisms	1
11	Нарушение правил технической эксплуатации электрооборудования Violation of the rules of operation of electrical equipment	1
31	Прочие причины, связанные с нарушением правил устройства и эксплуатации транспортных средств Other reasons related to violation of the rules of operation of transport vehicles	1
33	Прочие причины, связанные с нарушением правил устройства и эксплуатации электрооборудования Other reasons related to violation of the rules of operation of electrical equipment	1

6. Выборка из отчета мероприятий по устранению причин.

7. В столбце «ущерб» прописываются погибшие, пострадавшие, а также экономический ущерб.

Формирование сводной таблицы для аварий, возникших на предприятиях НГК России, стало завершением работы в виде представления выходных характеристик для 1-го этапа методики оценки состояния ПрБ и ПБ на предприятиях НГК России.

На 2-м этапе (анализа данных с определением локальных приоритетов для мероприятий и служб) проводилась детальная проработка отчетов по авариям, возникшим на предприятиях НГК России. В данном случае (в связи с введенными ограничениями) рассматривались следующие службы (структурные подразделения): ПрБ; ПБ; охраны труда (ОТ); структурного подразделения, выполняющего задачи по обеспечению функционирования технологического процесса (Основное подразделение).

На данном этапе проводились следующие операции:

1. Операция по формированию иерархии целей. Производилась декомпозиция проблемы принятия решений с выделением главных целей, подцелей и различных целевых функций (альтернатив). Элементы одинаковых уровней сопоставлялись друг с другом с точки зрения возможности установления приоритетов. Использование МАИ позволило определить потенциальные недоработки служб (структурных подразделений), которые необходимо учитывать. В результате декомпозиции получены следующие иерархии (рис. 2).

Математически задача формулировалась следующим образом. Требовалось найти аналитическое выражение выходного параметра (y) от определяющих его факторов ($x_1, x_2, \dots, x_j, \dots, x_n$), т.е. потребовалось найти функцию

$$A = f(a_1, a_2, \dots, a_n), \quad (1)$$

которая наилучшим образом воспроизведет эмпирические данные зависимостей переменной (y) и раскроет характер степени влияния аргументов на функцию [20]. Для проведения такого исследования потребовалось использовать данные за определенный промежуток времени, относящиеся к классу одно-

родных (однотипных) параметров причин возникновения аварий и пожаров. С целью получения конкретных показателей, имеющих числовую величину и получаемых из результатов с их характеристическим описанием, были использованы матрицы следующего вида:

$$A = \begin{matrix} & \begin{matrix} A_1 & A_2 & \dots & A_n \end{matrix} \\ \begin{matrix} A_1 \\ A_2 \\ \vdots \\ A_n \end{matrix} & \begin{bmatrix} w_1/w_1 & w_1/w_2 & \dots & w_1/w_n \\ w_1/w_2 & w_2/w_2 & \dots & w_2/w_n \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ w_n/w_1 & w_n/w_2 & \dots & w_n/w_n \end{bmatrix} \end{matrix} \quad \begin{bmatrix} w_1 \\ w_2 \\ \vdots \\ w_n \end{bmatrix} = n \begin{bmatrix} w_1 \\ w_2 \\ \vdots \\ w_n \end{bmatrix}, \quad (2)$$

где $w_1, \dots, w_n$ имеют отношение к весам, рассчитываемым в виде натуральных чисел (от 1 до 9), представляющих точное числовое значение;

n — общее число рассматриваемых в выборке альтернатив, имеющих отношение к рангу матрицы.

Следовательно, если установить факт в выборке отклонений в виде чисел от идеальных отношений $w_1/w_1 \dots w_n/w_n$, представляющих показатели в виде числовых коэффициентов $\lambda_1 \dots \lambda_n$, можно установить факт максимального отклонения от идеальных отношений в виде зависимости значения n через $\lambda_{\max}$, тогда задача имеет единственное решение и может быть представлена в виде:

$$A = (A_1 - A_n) = \frac{1}{\lambda_{\max}} \sum_{i=1}^n a_n w_n (n=1-9). \quad (3)$$

Важность влияния каждого элемента матричной выборки на достижение цели определялась решением уравнения:

$$|A - \lambda_{\max} w_n| = 0. \quad (4)$$

Потребовалось определить максимальное число $\lambda_{\max}$ и вектор приоритета строки $\bar{q}$:

$$|A - \lambda_{\max} w_{1-n}| \bar{q} = 0. \quad (5)$$

Уравнения (4) и (5) решались с помощью весовых коэффициентов, входящих в содержание метода Ньютона, а нулевое приближение находилось как среднее геометрическое:

$$\bar{q} = (q_1, q_2, q_3, \dots, q_n), \quad (6)$$

где

$$\begin{aligned} q_1 &= (q_{11}, q_{12}, q_{13}, \dots, q_{1n}), \\ q_2 &= (q_{21}, q_{22}, q_{23}, \dots, q_{2n}), \\ &\dots \\ q_n &= (q_{n1}, q_{n2}, q_{n3}, \dots, q_{nn}). \end{aligned} \quad (7)$$

Были рассчитаны локальные приоритеты сравниваемых элементов. Для каждой строки матрицы определялось геометрическое среднее ее элементов, затем полученные результаты суммировались, а показатель с геометрически средним численным значением каждой из строк матрицы делился на ранее полученную

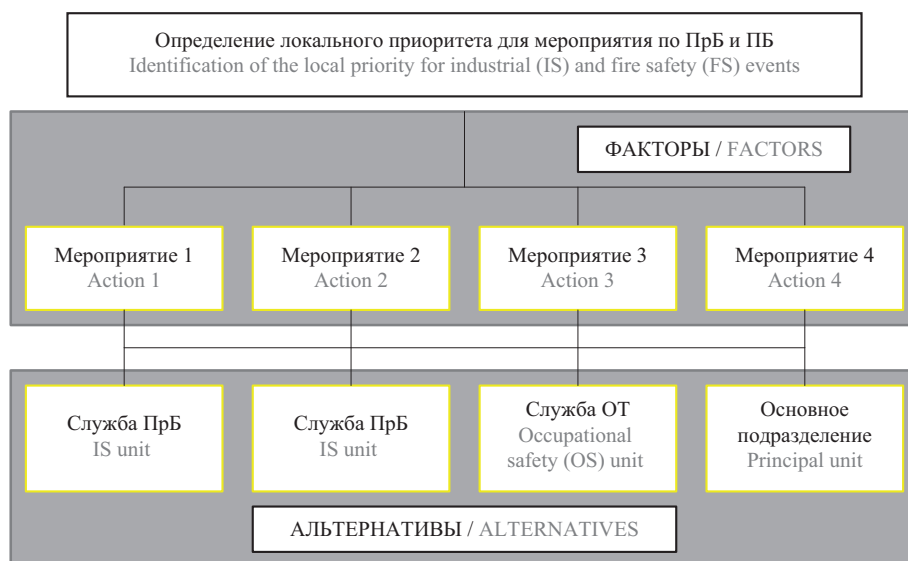


Рис. 2. Иерархия проблемы определения приоритета при проведении оценки

Fig. 2. Priority setting problem hierarchy used in the course of assessment

сумму [21]. В результате были получены показатели локальных приоритетов для каждого пронормированного мероприятия, взятого из отчетов по авариям. Фрагмент таблицы, представляющей порядок получения локальных приоритетов для оцениваемых мероприятий (см. табл. 2).

В табл. 2 представлены показатели отношения согласованности (ОС), где утверждалось, что экс-

пертный расчет будет считаться согласованным при выполнении условия $ОС \leq 0,1$.

Учитывалась необходимость согласования результатов, полученных от нескольких экспертов, из-за возможного наличия погрешностей в виде существенных отклонений. Принимались во внимание отношения согласованности (ОС), индекс согласованности (ИС), случайный индекс (СИ).

Таблица 2. Сведения о получении показателей локальных приоритетов оцениваемых мероприятий и отношения согласованности суждений экспертов

Table 2. Information about the indicators of local priorities of assessed activities and the expert consistency ratio

Перечень мероприятий, ставших причинами возникновения опасностей (аварий и пожаров) List of events causing hazards (accidents and fires)	1. Нарушение порядка и последовательности пусковых операций Violation of the order and sequence of launch operations	2. Неудовлетворительный контроль за проведением пусковых операций Unsatisfactory control over the launch operations	3. Ненадлежащее исполнение своих должностных обязанностей руководителями и специалистами организации Improper performance of their official duties by managers and specialists of the organization	4. Неудовлетворительная организация производственного контроля на опасном производственном объекте Unsatisfactory organization of production control at a dangerous production facility	Произведение Product	$\sqrt[4]{\Pi}$	Локальный вектор приоритета Local priority vector
1. Нарушение порядка и последовательности пусковых операций Violation of the order and sequence of launch operations	1	1/3	1/5	1/7	0,01	0,31	0,06
2. Неудовлетворительный контроль за проведением пусковых операций Unsatisfactory control over the launch operations	3	1	1/3	1/5	0,20	0,67	0,12
3. Ненадлежащее исполнение своих должностных обязанностей руководителями и специалистами организации Improper performance of their official duties by managers and specialists of the organization	5	3	1	1/3	5,00	1,50	0,26
4. Неудовлетворительная организация производственного контроля на опасном производственном объекте Unsatisfactory organization of production control at a dangerous production facility	7	5	3	1	105,00	3,20	0,56
Вектор столбца Column vector	16,00	9,33	4,53	1,68		5,68	1,00
$\lambda_{\max}$	4,12						
ИС	0,04						
ОС	0,04						

Таблица 3. Зависимость показателя случайной согласованности от ранга матрицы**Table 3.** Dependence between the random consistency indicator and the matrix rank

Размерность матрицы Matrix dimensions	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Случайная согласованность Random consistency	0	0	0,58	0,9	1,12	1,24	1,32	1,41	1,45	1,49

Представленные характеристики соотносятся как

$$ОС = ИС/СИ. \quad (8)$$

При этом ИС находят с помощью выражения

$$ИС = (\lambda_{\max} - n)/(n - 1), \quad (9)$$

где $\lambda_{\max}$ вычислялся следующим образом:

- суммировался каждый столбец матрицы;
- затем сумма первого столбца умножалась на показатель первой компоненты локального вектора приоритетов, а сумма второго столбца на показатель второй компоненты и т.д. (расположены в каждой из четырех строк табл. 2);
- затем полученные показатели суммировались между собой.

n — размерность матрицы, в данном случае матрица в табл. 3 является четырехранговой;

Показатель СИ определялся расчетным числом, представленным зависимостью от ранга матрицы (табл. 3).

Показатель отношения согласованности, представленный в табл. 3, считается согласованным, так как выполняется условие для $ОС \leq 0,1$.

При определении уровневого показателя рейтинга для каждого мероприятия, взятого из отчетов по авариям на предприятиях НГК России, возникла необходимость в рассмотрении функционала F , связывающего вероятность P возникновения неблагоприятного события и математическое ожидание ущерба U от этого неблагоприятного события объекта и его элемента

$$R = F_R \{U, P\} = \sum_i [F_{R_i} (U_i, P_i)], \quad (10)$$

где R — результат оценки рисков;

i — виды неблагоприятных событий.

Для качественного и количественного анализа рисков по выражению (10) на базе фундаментальных и прикладных исследований велось построение математических моделей анализируемых элементов, создающих угрозы возникновения опасностей как отдельным отраслевым (ведомственным) подсистемам, так и комплексной безопасности по соответствующим видам безопасности и их сочетаниям. В этих моделях с целью определения зависимости, связывающей

вероятность возникновения опасности P и математическое ожидание ущерба U от этого неблагоприятного i -го события объекта (его элемента), использовались нормированные коэффициенты q , которые определялись на основе привязки к ущербам, показанным в отчетах по авариям на предприятиях НГК России. При таком подходе использовалась конкретная привязка к функционированию их конкретных видов технологического процесса производства: добыча (Д); переработка (П); хранение (Х); транспортировка (Т).

Общий ущерб U рассчитывался через сумму ущербов, относящихся к видам его составляющих процессов производства $U_{(Д,П,Х,Т)}$, наносимых объектам защиты техносферы (персоналу, материальным средствам и оборудованию), оцениваемый по двум показателям: экономическому — в рублях (условных единицах) и человеческим потерям (безвозвратным/санитарным потерям) (табл. 4).

$$U = F_U \{U_D, U_P, U_X, U_T\} = \sum_i [F_{U_{(Д,П,Х,Т)}} (U_D, U_P, U_X, U_T)] q_{(0,01-1)}. \quad (11)$$

Вероятность P анализируемой опасности (ее составляющих по видам $P_{(Д,П,Х,Т)}$) оценивалась как функционал причин возникновения опасностей (пожаров) с привязкой к коду причин, взятых из приказа МЧС России³.

$$P = F_P \{P_D, P_P, P_X, P_T\} = \sum_i [F_{P_{(Д,П,Х,Т)}} (P_D, P_P, P_X, P_T)] q_{(0,01-1)}. \quad (12)$$

Далее проводилась операция по определению целевых показателей работы каждой из служб. На этом временном отрезке последовательно вычислялись локальные векторы приоритетов и проверялась с помощью экспертов согласованность результатов работы каждой из служб (структурных подразделений), выполняющих мероприятия по контролю каждого элемента иерархии. Выполним расчеты для нашего примера (см. фрагменты табл. 5–8).

Таблица 4. Результаты использования нормированного коэффициента q от ущерба в рублях и человеческих потерь (погибших, пострадавших)

Table 4. Results of using the normalized coefficient q of damage in rubles and human losses (dead, injured)

q	Погибшие Casualties	Пострадавшие Victims	Ущерб, тыс. руб. Damage, thousand rubles	q	Ущерб, тыс. руб. Damage, thousand rubles	q	Ущерб, тыс. руб. Damage, thousand rubles
$q = 1$	8	32	620,0	$q = 0,6$	957 000	$q = 0,2$	357,394
	6	2	14 500,0		809 450		344,46
	4	13	4,2		631 449		273
	4		2500,0		560 000		248,975
	3	6	21,2	$q = 0,5$	400 000,0	$q = 0,1$	240
$q = 0,9$	2		11 501		347 900,0		228
	2				220 000,0		216,611
	1	5	1359,50		209 900,0		200
	1	2	387 000		133 587,0		199
	1	1	79 390		132 400,0		198
	1	1			123 416,0		162
	1		10 180		68 682,6		39,6
	1		5050		32 391,0		10
	1		1 633,85		23 800,0		
	1		1 122,27		16 770,0		
	1		364		15 196,0		
	1		25		14 243,0		
	1				5904,5		
	1				5333,2		
$q = 0,8$		18		$q = 0,4$	4925		
		11	206 000,0		3644		
		3			3265		
$q = 0,7$		2	158,0		2829		
		2		$q = 0,3$	2820		
		1	8000,0		1551,97		
		1	1466,0		897,788		
		1	250,0		800		
		1	194,0	$q = 0,2$	664,4		
		1	29,0		458,3		
		1	6,9		360		

Таблица 5. Зависимость показателей работы служб (структурных подразделений) при рассмотрении мероприятия № 1 (табл. 2)
Table 5. Dependence of the performance indicators of the service (structural divisions) when considering activity No. 1 (Table 2)

Нарушение порядка и последовательности пусковых операций Violation of the procedure and sequence of launch operations	ПрБ IS	ПБ FS	ОТ LP	Основное подразделение Principal unit	Произведение Product	$\sqrt[4]{\Pi}$	Локальный вектор приоритета Local priority vector
ПрБ IS	1	5	7	1/3	11,67	1,85	0,31
ПБ FS	1/5	1	1	1/5	0,04	0,45	0,08
ОТ LP	1/7	1	1	1/7	0,02	0,38	0,06
Основное подразделение Principal unit	3	5	7	1	105,00	3,20	0,54
Вектор столбца Column vector	4,34	12,00	16,00	1,68		5,87	1,00
$\lambda_{\max}$	4,22						
ИС	0,07						
ОС	0,08						

Службами (структурными подразделениями), имеющими максимальное воздействие на оцениваемое мероприятие, являются *основное подразделение и служба промышленной безопасности*.

Таблица 6. Зависимость показателей работы служб (структурных подразделений) при рассмотрении мероприятия № 2 (табл. 2)
Table 6. Dependence of the performance indicators of services (structural divisions) when considering activity No. 2 (Table 2)

Неудовлетворительный контроль за проведением пусковых операций Unsatisfactory control over launch operations	ПрБ IS	ПБ FS	ОТ LP	Основное подразделение Principal unit	Произведение Product	$\sqrt[4]{\Pi}$	Локальный вектор приоритета Local priority vector
ПрБ IS	1	3	5	7	105,00	3,20	0,58
ПБ FS	1/3	1	3	3	3,00	1,32	0,24
ОТ LP	1/5	1/3	1	3	0,20	0,67	0,12
Основное подразделение Principal unit	1/7	1/3	1/3	1	0,02	0,35	0,06
Вектор столбца Column vector	1,68	4,67	9,33	14,00		5,54	1,00
$\lambda_{\max}$	4,10						
ИС	0,03						
ОС	0,04						

Службами (структурными подразделениями), имеющими максимальное воздействие на оцениваемое мероприятие, являются *службы промышленной и пожарной безопасности*.

Таблица 7. Зависимость показателей работы служб (структурных подразделений) при рассмотрении мероприятия № 3 (табл. 2)
Table 7. Dependence of performance indicators of services (structural divisions) when considering activity No. 3 (Table 2)

Ненадлежащее исполнение своих должностных обязанностей руководителями и специалистами организации Improper performance of their official duties by managers and specialists of the organization	ПрБ IS	ПБ FS	ОТ LP	Основное подразделение Principal unit	Произведение Product	$\sqrt[4]{П}$	Локальный вектор приоритета Local priority vector
ПрБ IS	1	3	5	7	105,00	3,20	0,58
ПБ FS	1/3	1	3	3	3,00	1,32	0,24
ОТ LP	1/5	1/3	1	3	0,20	0,67	0,12
Основное подразделение Principal unit	1/7	1/3	1/3	1	0,02	0,35	0,06
Вектор столбца Column vector	1,68	4,67	9,33	14,00		5,54	1,00
$\lambda_{\max}$	4,10						
ИС	0,03						
ОС	0,04						

Службами (структурными подразделениями), имеющими максимальное воздействие на оцениваемое мероприятие, являются *службы промышленной и пожарной безопасности*.

Таблица 8. Зависимость показателей работы служб (структурных подразделений) при рассмотрении мероприятия № 4 (табл. 2)
Table 8. Dependence of performance indicators of services (structural divisions) when considering activity No. 4 (Table 2)

Неудовлетворительная организация производственного контроля на опасном производственном объекте Unsatisfactory organization of production control at a hazardous production facility	ПрБ IS	ПБ FS	ОТ LP	Основное подразделение Principal unit	Произведение Product	$\sqrt[4]{П}$	Локальный вектор приоритета Local priority vector
ПрБ IS	1	3	5	1	15,00	1,97	0,39
ПБ FS	1/3	1	3	1/3	0,33	0,76	0,15
ОТ LP	1/5	1/3	1	1/5	0,01	0,34	0,07
Основное подразделение Principal unit	1	3	5	1	15,00	1,97	0,39
Вектор столбца Column vector	2,53	7,33	14,00	2,53		5,04	1,00
$\lambda_{\max}$	4,03						
ИС	0,01						
ОС	0,01						

Службами (структурными подразделениями), имеющими максимальное воздействие на оцениваемое мероприятие, являются *служба промышленной безопасности и основное подразделение*.

3-й этап (*синтез данных*) включал проведение последовательных операций, *связанных с определением коэффициентов связи, воздействия (влияния) служб (структурных подразделений)* на обеспечиваемые ведомственными (отраслевыми) подсистемами через выполнение мероприятий по контролю за исполнением установленных требований НПА и НД. Решались следующие операции.

1. Операция по определению коэффициента связи служб (структурных подразделений) с обеспечиваемыми ведомственными (отраслевыми) подсистемами. При использовании моделей математической статистики рассчитывались парные и частные коэффициенты корреляции ввиду их исключительной роли в количественной оценке взаимосвязи между отдельными переменными анализируемой совокупности обрабатываемых результатов. Значения коэффициента связи, рассматриваемого в виде парной корреляции r_{ij} между любыми переменными x_i и x_j , представленными в виде матрицы (10), определялись по формуле

$$r_{ij} = \frac{\sum_{i=1}^n (x_{ij} - \bar{x}_i) \cdot (x_{ij} - \bar{x}_j)}{\sqrt{\sum_{i=1}^n (x_{ij} - \bar{x}_i)^2 \cdot \sum_{i=1}^n (x_{ij} - \bar{x}_j)^2}}. \quad (13)$$

Тогда рассчитанные коэффициенты парной корреляции для матрицы исходных данных (12) стали составлять матрицу P_r , причем матрица P_r симметрична относительно главной диагонали, так как для любых i и j , $r_{ij} = r_{ji}$. Поэтому для определения *коэффициента связи служб (структурных подразделений)* с обеспечиваемыми ведомственными (отраслевыми) подсистемами стала иметь важное исследовательское значение как наиболее часто определяемая характеристика многомерной системы. Пример с привязкой к рассчитанным и представленным показателям, отраженным в табл. 2, 5–8, по *определению коэффициента связи служб (структурных подразделений)* с обеспечиваемыми ведомственными (отраслевыми) подсистемами (табл. 9).

Локальные приоритеты альтернатив умножались на приоритеты соответствующих уровней, далее суммировались по каждому элементу в соответствии с факторными значениями. Затем для исследуемой иерархии определялись приоритеты с показателями воздействия служб (структурных подразделений) с учетом приоритетов оцениваемых мероприятий. Наиболее высокий рейтинг соответствует альтернативе с наибольшим значением приоритета для служб промышленной и пожарной безопасности (см. табл. 9).

Таблица 9. Расчет по определению глобального приоритета работы служб (структурных подразделений)

Table 9. The calculated global priority in the work of services (structural units)

Перечень мероприятий, ставших причинами возникновения опасностей (аварий и пожаров) List of measures that have caused hazards (accidents and fires)	Нарушение порядка и последовательности пусковых операций Violation of the procedure and sequence of launch operations	Неудовлетворительный контроль за проведением пусковых операций Unsatisfactory control over launch operations	Ненадлежащее исполнение своих должностных обязанностей руководителями и специалистами организации Improper performance of responsibilities by corporate managers and specialists	Неудовлетворительная организация производственного контроля на опасном производственном объекте Unsatisfactory organization of production control at a hazardous production facility	Глобальный приоритет Global priority
Интегральные значения Integral values	0,06	0,12	0,26	0,56	
ПрБ IS	0,31	0,58	0,58	0,39	0,47
ПБ FS	0,08	0,24	0,24	0,15	0,18
ОТ LP	0,06	0,12	0,12	0,07	0,07
Основное подразделение Principal unit	0,54	0,06	0,06	0,39	0,28

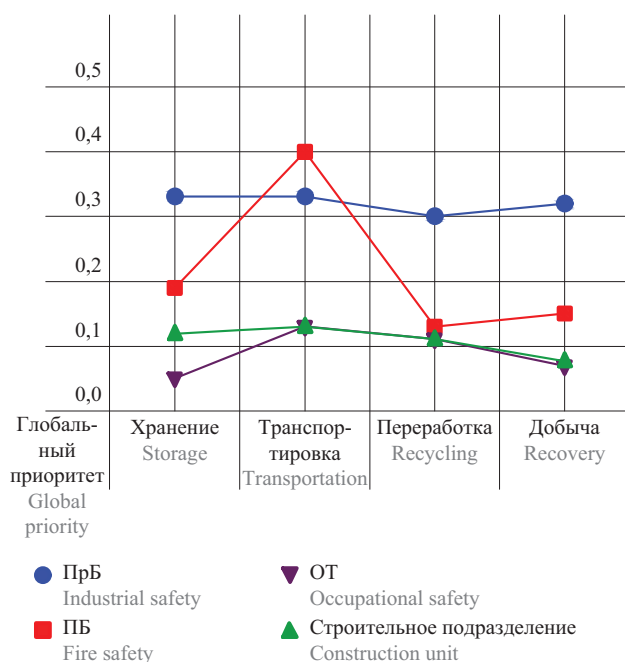


Рис. 3. Показатели уровней воздействия служб (структурных подразделений) с привязкой к видам деятельности предприятий НГК России

Fig. 3. Indicators of levels of impact made by the services (structural units) broken down by the types of activities conducted by Russian oil and gas enterprises

Рассчитанные показатели уровней воздействия служб (структурных подразделений) на обеспечиваемые подсистемы представлены на рис. 3.

На рис. 3 в виде кусочно-линейной аппроксимации представлены результаты коэффициентов связи служб (структурных подразделений) с обеспечиваемыми подсистемами. Полученные представленные значения весовых коэффициентов связи стали исходными данными для определения коэффициентов воздействия служб (структурных подразделений) на обеспечиваемые ими подсистемы.

Выводы

Доказана актуальность проведения дальнейших исследований в комплексной безопасности для предприятий НГК России. Представлен обоснованный вариант по выбору МАИ метода исследования, направленного на получение оценки состояния существующей системы для ее дальнейшего совершенствования и развития. Сформирована методика оценки состояния промышленной и пожарной безопасности на предприятиях НГК России. Приведен пример с определением рейтинга влияния, рассматриваемого в виде не исполнения документа (нормативного-правового акта), изданного в отраслевой подсистеме Ростехнадзора, который в дальнейшем может быть проставлен в проверочные листы (списки контрольных вопросов), формы и содержание которых представлены в проекте приказа Федеральной службы по экологическому, технологическому и атомному надзору.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Абросимов Н.В., Агеев А.И., Акимов В.А., Аксютин О.Е., Алдошин С.М., Алешин А.В. и др. Безопасность России. Правовые, социально-экономические и научно-технические аспекты. Фундаментальные и прикладные проблемы комплексной безопасности / под ред. Махутова Н.А. М. : Знание, 2017. 992 с.
2. Гордиенко Д.М., Шебеко А.Ю., Зубань А.В., Шебеко Ю.Н., Молчанов В.П., Воевода С.С. Оценка пожарного риска для крупномасштабного хранилища сжиженного природного газа // Пожарная безопасность. 2017. № 3. С. 26–31. URL: <https://elibrary.ru/item.asp?id=30014168>
3. Landucci G., Argenti F., Cozzani V., Reniers G. Assessment of attack likelihood to support security risk assessment studies for chemical facilities // Process Safety and Environmental Protection. 2017. Vol. 110. Pp. 102–114. DOI: 10.1016/j.psep.2017.06.019
4. Жуков И.С., Лисанов М.В., Самусева Е.А. Критерии допустимого социального риска при авариях на опасных производственных объектах // Безопасность труда в промышленности. 2020. № 5. С. 79–86. DOI: 10.24000/0409-2961-2020-5-79-86
5. Vairo T., Pontiggia M., Fabiano B. Critical aspects of natural gas pipelines risk assessments. A case-study application on buried layout // Process Safety and Environmental Protection. 2021. Vol. 149. Pp. 258–268. DOI: 10.1016/j.psep.2020.10.050
6. Гвоздев Е.В., Грибанова Е.Б., Матвиенко Ю.Г. Методология анализа показателей влияния человеческого фактора на комплексную безопасность электроэнергетических предприятий // Безопасность труда в промышленности. 2020. № 12. С. 38–43. DOI: 10.24000/0409-2961-2020-12-38-43
7. Гвоздев Е.В., Матвиенко Ю.Г. Комплексная оценка риска на предприятиях жизнеобеспечения, имеющих опасные производственные объекты // Безопасность труда в промышленности. 2019. № 10. С. 69–78. DOI: 10.24000/0409-2961-2019-10-69-78

8. Ding L., Khan F., Ji J. Risk-based safety measure allocation to prevent and mitigate storage fire hazards // *Process Safety and Environmental Protection*. 2020. Vol. 135. Pp. 282–293. DOI: 10.1016/j.psep.2020.01.008
9. Zhu Q.J., Su G.H. Research on the human resources performance management based on the strategic direction data mode analysis // *Applied Mechanics and Materials*. 2014. Vol. 687–691. Pp. 4560–4563. DOI: 10.4028/www.scientific.net/AMM.687-691.4560
10. Emmers R. Comprehensive security and resilience in Southeast Asia: ASEAN's approach to terrorism // *The Pacific Review*. 2009. Vol. 22 (2). Pp. 159–177. DOI: 10.1080/09512740902815300
11. Абросимов Н.В., Аксютин О.Е., Алешин А.В., Алешин Н.П., Ахметханов Р.С., Баршполец В.А. и др. Безопасность России. Правовые, социально-экономические и научно-технические аспекты. Научные основы промышленной безопасности. М. : Знание, 2019. 824 с.
12. Гвоздев Е.В., Матвиенко Ю.Г. К обеспечению комплексной безопасности предприятий, имеющих опасные производственные объекты // *Проблемы безопасности и чрезвычайных ситуаций*. Научный информационный сборник. 2020. № 2. С. 72–81. DOI: 10.36535/0869-4176-2020-02-9
13. Махутов Н.А., Матвиенко Ю.Г., Романов А.Н. Проблемы прочности, техногенной безопасности и конструкционного материаловедения : монография. М. : URSS, 2018. 720 с.
14. Gorecky D., Schmitt M., Loskyll M., Zühlke D. Human-machine-interaction in the industry 4.0 era // 2014 12th IEEE International Conference on Industrial Informatics (INDIN). 2014. DOI: 10.1109/INDIN.2014.6945523
15. Donham K.J., Thelin A., Donham K.J., Thelin A. General environmental hazards in agriculture communities // *Agricultural Medicine*. 2016. Pp. 251–291. DOI: 10.1002/9781118647356.ch7
16. Махутов Н.А., Фридлянд Я.М., Распопов А.А., Лисанов М.В. Развитие подходов к решению задач обеспечения прочности, ресурса и безопасности магистрального нефтепроводного транспорта // *Безопасность труда в промышленности*. 2019. № 9. С. 7–14. DOI: 10.24000/0409-2961-2019-9-7-14
17. Zhao S., Song J., Ermon S. The information autoencoding family: A lagrangian perspective on latent variable generative models // 34th Conference on Uncertainty in Artificial Intelligence 2018, UAI 2018. 2018.
18. Mróz K., Hager I., Korniejenko K. Material solutions for passive fire protection of buildings and structures and their performances testing // *Procedia Engineering*. 2016. Vol. 151. Pp. 284–291. DOI: 10.1016/j.proeng.2016.07.388
19. Махутов Н.А., Гаденин М.М., Буйновский С.Н., Гражданкин А.И. Научные основы промышленной безопасности в многотомном издании «Безопасность России. Правовые, социально-экономические и научно-технические аспекты» // *Безопасность труда в промышленности*. 2020. № 4. С. 17–26. DOI: 10.24000/0409-2961-2020-4-17-26
20. Саати Т. Принятие решений. Метод анализа иерархий : пер. с англ. М. : Радио и связь, 1993. 320 с.
21. Гвоздев Е.В., Рыбаков А.В. О методике оценки состояния пожарной безопасности на предприятии ОАО «Мосводоканал» // *Научные и образовательные проблемы гражданской защиты*. 2014. № 3. С. 68–80. URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/o-metodike-otsenki-sostoyaniya-pozharnoy-bezopasnosti-na-predpriyatii-oao-mosvodokanal>

REFERENCES

1. Abrosimov N.V., Ageev A.I., Akimov V.A., Aksyutin O.E., Aldoshin S.M., Aleshin A.V. et al. *Security of Russia. Legal, socio-economic, scientific and technical aspects. Fundamental and applied problems of complex security*. Makhutova N.A. (ed.). Moscow, Znanie Publ., 2017; 992. (rus).
2. Gordienko D.M., Shebeko A.Yu., Zuban A.V., Shebeko Yu.N., Molchanov V.P., Voevoda S.S. Fire risk assessment for large storage of liquefied natural gas. *Pozharnaya bezopasnost' / Fire Safety*. 2017; 3:26–31. URL: <https://elibrary.ru/item.asp?id=30014168> (rus).
3. Landucci G., Argenti F., Cozzani V., Reniers G. Assessment of attack likelihood to support security risk assessment studies for chemical facilities. *Process Safety and Environmental Protection*. 2017; 110: 102–114. DOI: 10.1016/j.psep.2017.06.019
4. Zhukov I.S., Lisanov M.V., Samuseva E.A. Criteria for tolerable social risk in case of accidents at hazardous production facilities. *Occupational safety in industry*. 2020; 5:79–86. DOI: 10.24000/0409-2961-2020-5-79-86 (rus).
5. Vairo T., Pontiggia M., Fabiano B. Critical aspects of natural gas pipelines risk assessments. A case-study application on buried layout. *Process Safety and Environmental Protection*. 2021; 149:258–268. DOI: 10.1016/j.psep.2020.10.050

6. Gvozdev E.V., Gribanova E.B., Matvienko Yu.G. Methodology for Analysis of the Indicators of the Human Factor Effect on the Integrated Safety and Security of Electric Power Enterprises. *Occupational safety in industry*. 2020; 12:38-43. DOI: 10.24000/0409-2961-2020-12-38-43 (rus).
7. Gvozdev E.V., Matvienko Yu.G. Comprehensive Risk Assessment at the Life Support Enterprises with Hazardous Production Facilities. *Occupational safety in industry*. 2019; 10:69-78. DOI: 10.24000/0409-2961-2019-10-69-78 (rus).
8. Ding L., Khan F., Ji J. Risk-based safety measure allocation to prevent and mitigate storage fire hazards. *Process Safety and Environmental Protection*. 2020; 135:282-293. DOI: 10.1016/j.psep.2020.01.008
9. Zhu Q.J., Su G.H. Research on the human resources performance management based on the strategic direction data mode analysis. *Applied Mechanics and Materials*. 2014; 687-691:4560-4563. DOI: 10.4028/www.scientific.net/AMM.687-691.4560
10. Emmers R. Comprehensive security and resilience in Southeast Asia: ASEAN's approach to terrorism. *The Pacific Review*. 2009; 22(2):159-177. DOI: 10.1080/09512740902815300
11. Abrosimov N.V., Aksyutin O.E., Alyoshin A.V., Aleshin N.P., Akhmetkhanov R.S., Barishpolets V.A. et al. Security of Russia. *Legal, socio-economic, scientific and technical aspects. scientific foundations of industrial safety*. Moscow, Znanie Publ., 2019; 824. (rus).
12. Gvozdev E.V., Matvienko Yu.G. To ensure complex safety of enterprises with hazardous production facilities. *Problems of safety and emergency situations. Scientific information collection*. 2020; 2:72-81. DOI: 10.36535/0869-4176-2020-02-9 (rus).
13. Makhutov N.A., Matvienko Yu.G., Romanov A.N. *Problems of strength, technogenic safety and structural materials science : Monograph*. Moscow, URSS, 2018; 720. (rus).
14. Gorecky D., Schmitt M., Loskyll M., Zühlke D. Human-machine-interaction in the industry 4.0 era. *2014 12th IEEE International Conference on Industrial Informatics (INDIN)*. 2014. DOI: 10.1109/INDIN.2014.6945523
15. Donham K.J., Thelin A., Donham K.J., Thelin A. General Environmental Hazards in Agriculture Communities. *Agricultural Medicine*. 2016; 251-291. DOI: 10.1002/9781118647356.ch7
16. Makhutov N.A., Fridlyand Ya.M., Raspopov A.A., Lisanov M.V. Development of approaches to solving the problems of ensuring strength, service life and safety of the trunk oil transportation. *Occupational safety in industry*. 2019; 9:7-14. DOI: 10.24000/0409-2961-2019-9-7-14 (rus).
17. Zhao S., Song J., Ermon S. The information autoencoding family: A lagrangian perspective on latent variable generative models. *34th Conference on Uncertainty in Artificial Intelligence 2018, UAI 2018*. 2018.
18. Mróz K., Hager I., Korniejewski K. Material Solutions for Passive Fire Protection of Buildings and Structures and Their Performances Testing. *Procedia Engineering*. 2016; 151:284-291. DOI: 10.1016/j.proeng.2016.07.388
19. Makhutov N.A., Gadenin M.M., Buinovskiy S.N., Grazhdankin A.I. Scientific Fundamentals of Industrial Safety in the Multivolume Series "Safety of Russia. Legal, Socio-Economic and Scientific-Technical Aspects". *Occupational safety in industry*. 2020; 4:17-26. DOI: 10.24000/0409-2961-2020-4-17-26 (rus).
20. Saati T. *Decision-making. Method of hierarchy analysis : Trans. from English*. M.: Radio and communication Publ., 1993; 320. (rus).
21. Gvozdev E.V., Rybakov A.V. About the methodology for assessing the state of fire safety the enterprise JSC "Mosvodokanal". *Scientific and educational problems of civil protection*. 2014; 3:68-80. URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/o-metodike-otsenki-sostoyaniya-pozharnoy-bezopasnosti-na-predpriyatii-oao-mosvodokanal> (rus).

Поступила 13.08.2021, после доработки 12.11.2021; принята к публикации 31.01.2022
Received August 13, 2021; Received in revised form November 12, 2021; Accepted January 31, 2022

Информация об авторе

ГВОЗДЕВ Евгений Владимирович, канд. техн. наук, доцент кафедры автоматизации и электроснабжения, Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет, Россия, 129337, г. Москва, Ярославское шоссе, 26; РИНЦ ID: 296055; ORCID: 0000-0002-3679-1065; e-mail: evgvozdev@mail.ru

Information about the author

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

ПОЖАРОВЗРЫВБЕЗОПАСНОСТЬ/FIRE AND EXPLOSION SAFETY. 2022. Т. 31. № 1. С. 65–76
POZHAROVZRYVOBEZOPASNOST/FIRE AND EXPLOSION SAFETY. 2022; 31(1):65-76

НАУЧНАЯ СТАТЬЯ/RESEARCH PAPER

УДК: 656.13;614.84;517.958:539:3(6)

<https://doi.org/10.22227/0869-7493.2022.31.01.65-76>

Оценка несущей способности гнездовых контактов розетки при экспертизе пожаров

Александр Игнатьевич Недобитков✉, Борис Масгутович Абдеев

Восточно-Казахстанский технический университет им. Д. Серикбаева, г. Усть-Каменогорск, Республика Казахстан

АННОТАЦИЯ

Введение. Приведенные в статье данные свидетельствуют, что проблема повышения пожарной безопасности при эксплуатации розеток очень актуальна. Целью статьи является разработка научно-обоснованного метода исследования гнездовых контактов розетки, имеющих признаки большого переходного сопротивления или изменение геометрической формы, для установления причины повреждения в ходе пожарно-технической экспертизы.

Материалы и методика. Исследования проводились с использованием растрового электронного микроскопа JSM-6390LV с приставкой для энергодисперсионного микроанализа. Объектами исследования являлись розетки типа C (EU Type C) и типа F (EU Type F). Поверхности разрушения контактов розетки подвергались анализу без предварительной пробоподготовки.

Теоретические основы (теория и расчеты). Разработана физико-математическая модель предельной несущей способности гнездового контакта розетки, соответствующая реальной конструкции, и на этой основе сформулирован расчетно-практический алгоритм экспертного анализа ее механико-геометрических характеристик. Решение доведено до простых расчетных формул, позволяющих оценивать несущую способность контактов розетки. На конкретном примере показана применимость разработанной математической модели для проведения пожарно-технической экспертизы.

Результаты и обсуждение. Приведены примеры возгораний розеток, возникновение которых обусловлено утратой несущей способности гнездового контакта в процессе эксплуатации. Приведены снимки оксидной пленки на поверхности контакта и ее элементный состав. Экспериментальными данными подтверждено, что оплавление контактов и наличие оксидной пленки, обладающей высоким удельным сопротивлением, являются значимыми криминалистическими признаками при установлении причины пожара.

Выводы. Предложен метод определения несущей способности контактов розетки, на основании которого можно сделать вывод о причастности возгорания розетки к последующему пожару. Приведенные в статье данные могут быть использованы специалистами при экспертном исследовании контактов розеток, изымаемых с мест пожаров, установлении механизма их повреждения и, в конечном счете, причины пожара.

Ключевые слова: растровая электронная микроскопия; напряженно-деформированное состояние; пожарно-техническая экспертиза; розетка; контактное давление; механическое напряжение

Для цитирования: Недобитков А.И., Абдеев Б.М. Оценка несущей способности гнездовых контактов розетки при экспертизе пожаров // Пожаровзрывобезопасность/Fire and Explosion Safety. 2022. Т. 31. № 1. С. 65–76. DOI: 10.22227/0869-7493.2022.31.01.65-76

✉ Недобитков Александр Игнатьевич, e-mail: a.nedobitkov@mail.ru

Evaluation of the bearing capacity of socket contacts within the framework of a fire investigation

Alexandr I. Nedobitkov✉, Boris M. Abdееv

D. Serikbayev East Kazakhstan Technical University, Ust-Kamenogorsk, Republic of Kazakhstan

ABSTRACT

Introduction. The data, provided in the article, demonstrate the relevance of the socket fire safety improvement in the course of operation. The purpose of the article is to develop a research-backed method of examining the socket contacts that feature high transient resistance or change in shape. The method can be subsequently used to identify causes of damages in a fire investigation.

Materials and methods. A JSM-6390LV scanning electron microscope with a module designated for the energy dispersive microanalysis is used in the research. The subjects of research are type C (EU Type C) and type F (EU Type F) sockets. The failure surfaces of socket contacts were analyzed without preliminary sample preparation.

Theoretical fundamentals (theory and calculations). A physical and mathematical model of the limit bearing capacity of socket contacts, similar to the real construction, has been developed. The model serves as the framework for a practical computational algorithm of the expert analysis of mechanical and geometrical characteristics. The solution is reduced to short calculation formulas, that can be used to evaluate the bearing capacity of socket contacts. The applicability of the developed mathematical model to fire investigations is proven in a specific example.

Results and discussion. The authors analyze cases of socket fires, caused by the loss of the bearing capacity of socket contacts in the process of operation. Photos of the oxide film on the contact surface and its elemental composition are provided in the article. The experimental data have proven that the fusion of contacts and the presence of an oxide film, featuring high specific resistivity, are a significant criminalistic evidence that helps to identify causes of fire.

Conclusions. The authors propose a method for the identification of the bearing capacity of socket contacts. The method can be used to determine if a subsequent fire is related to the socket ignition. The information, provided in the article, can be used by specialists in the course of an expert examination of socket contacts withdrawn from the site of the fire to identify the failure mechanisms and, ultimately, causes of fire.

Keywords: scanning electron microscopy; stress-strain state; fire investigation; contact stress; mechanical stress

For citation: Nedobitkov A.I., Abdeyev B.M. Evaluation of the bearing capacity of socket contacts within the framework of a fire investigation. *Pozharovzryvobezopasnost/Fire and Explosion Safety*. 2022; 31(1):65-76. DOI: 10.22227/0869-7493.2022.31.01.65-76 (rus).

✉ Alexandr Ignatyevich Nedobitkov, e-mail: a.nedobitkov@mail.ru

Введение

Авторами работ [1–3] наглядно показано, что пожары наносят значительный ущерб экономике государства. В своих работах V. Babrauskas акцентирует внимание на том, что значительная часть возгораний происходит из-за электрических неисправностей, связанных с проводкой или контактными устройствами, при этом доля розеток в общей статистике причин пожаров в США составляет около 11 % [3–5].

Автор [3–5] отмечает, что проблема заключается не в низкой надежности розеток и высокой вероятности их отказов, а в том, что в застроенной среде их очень много, и каждая под воздействием эксплуатационных факторов может выйти из строя и вызвать пожар.

В работе [6] приведены результаты исследований зависимости таких параметров электрических контактов розетки, как площадь и температура контакта от степени затяжки винтов на клеммах.

Авторами [7, 8] продемонстрированы экспериментальные результаты исследования розеток с целью установления криминалистически значимых признаков их отказов в процессе эксплуатации. В работах [7, 8] наглядно проиллюстрировано влияние широкого диапазона факторов на перегрев контактов розеток, включая момент затяжки винтовых клемм, способ подключения (с обратной или боковой проводкой) и материал корпуса розеток. Необходимо дополнить, что в работе [7] приведены данные по микроструктуре отгоревших медных проводников. Поскольку работа выполнялась в Соединенных Штатах Америки, то исследовались розетки типа А, ко-

торые имеют два плоских, параллельных между собой контакта. Указанный тип используется в большинстве стран Северной и Центральной Америки, а также в Японии.

Розетки типа F (EU Type F), применяемые в Европе и странах Евразийского экономического союза, исследовались в работе [9]. Авторы [9], изменяя крутящий момент винта, моделировали режимы большого переходного сопротивления, вызванные вибрацией окружающей среды или небрежностью установщика. Были испытаны различные типы и сечения медных проводов, а также нагрузки и их продолжительность. Подробно проанализировано влияние этих параметров на температуру контакта и электрическое сопротивление, возникновение искрения и последовательной электрической дуги. Исследователями показано, что деградация контактов вызвана ростом контактного сопротивления, обусловленного образованием оксидов на поверхности контакта. В статье [9] наглядно проиллюстрировано, что значительное снижение температуры контакта мало влияет на сопротивление контакта. Однако каждое повторение процесса нагрева вызывает повышение как контактного сопротивления, так и температуры контакта, обусловленных увеличением толщины оксидной пленки.

В работе [10] рассмотрены эксплуатационные случаи локального электродугового разрушения контактов розетки. Выявлены специфические признаки неаварийного электродугового разрушения штырей электрических вилок шнуров оборудования с импульсным блоком питания. Показаны различия в следовых картинах между аварийным большим

переходным сопротивлением и неаварийным эксплуатационным разрушением контактов розетки. Таким образом, показано, что далеко не каждое повреждение контактов розетки, фиксируемое на месте пожара, фактически приводит к пожару. На важность исследования электрических контактов, в том числе и при исследовании причин пожаров, указывается в работах [11–15]. Необходимо напомнить, что в 1913 г. Гаррис вывел четыре закона, которым подчиняются электрические контакты. Один из них сформулирован следующим образом: «Сопротивление контактов не зависит от величины их площади, а зависит только от полного давления в контакте». Следует указать, что в работе [16] приведены данные, что с уменьшением усилия сжатия в 2 раза переходное сопротивление контакт-деталей в зависимости от их размеров может увеличиться в 4 и более раз.

Таким образом, основополагающим фактором надежности, и соответственно, пожарной безопасности розетки в процессе эксплуатации является обеспечение нормативного контактного давления по ГОСТ Р 51322.1–2011 (МЭК 60884-1:2006) «Соединители электрические штепсельные бытового и аналогичного назначения» и ГОСТ 30988.2.6–2012 «Соединители электрические штепсельные бытового и аналогичного назначения».

В настоящей работе на основе исследований [5–10, 16] предпринята попытка обосновать математическую модель, применение которой позволит облегчить установление причинной связи между повреждением контактов розетки и пожаром.

Целью работы является теоретическое обоснование универсальной с принципиально-технологической точки зрения физико-математической модели оценки предельной несущей способности контактов розетки.

В статье поставлены следующие задачи:

- проанализировать силовое взаимодействие между штырем вилки и гнездовым контактом розетки по всей рабочей криволинейной поверхности в связи со специфическими особенностями конструкции;
- оценить повышенную упругость и малую деформируемость пружинной системы «розетка – вилка», как следствие ее статической неопределимости;
- довести решение до простых расчетных формул, позволяющих оценивать несущую способность контактов розетки;
- экспериментально подтвердить изменение геометрической формы контактов розетки и, соответственно, усилия контактного давления в процессе эксплуатации;
- наглядно показать наличие криминалистически значимого признака в виде оксидной пленки на поверхности контакта;

- проиллюстрировать применимость разработанной математической модели для проведения исследования гнездового контакта в рамках пожарно-технической экспертизы.

Материалы и методы исследования

Исследования проводились в Центре превосходства «Veritas» Восточно-Казахстанского технического университета им. Д. Серикбаева на растровом электронном микроскопе JSM-6390LV с приставкой для энергодисперсионного микроанализа. Поверхности разрушения контактов розетки подвергались анализу без предварительной пробоподготовки.

Объектами исследования являлись розетки типа С (EU Type C) и типа F (EU Type F), согласно стандарту¹ используемые в Европе и странах Евразийского экономического союза.

Теоретические основы

Следует напомнить, что под типом С понимается несколько разновидностей двухконтактных вилок и розеток. Все вилки типа С имеют два круглых штыря диаметром 4 или 4,8 мм и длиной 19 мм, расположенных на расстоянии 19 мм¹. Розетки, соответственно, имеют 2 круглых гнезда. Такие разъемы рассчитаны в основном на 220–250 В. Согласно ГОСТ 30851.2.2–2002 (МЭК 60320-2-2–98), а также Europlug (CEE 7/16) штыри вилок имеют диаметр 4 мм, а согласно CEE 7/4 (Schuko) — 4,8 мм. Но расстояние между штырями вилок одинаковое у вилок обоих стандартов. В итоге при эксплуатации электроприборов возможна комбинация вилок и розеток разных стандартов. Вполне очевидно, что вилка с тонкими штырями (4 мм) не может быть надежно установлена в розетке Schuko, что вызовет искрение или даже оплавление. Также необходимо отметить, что контакты розетки могут быть бронзовыми, лужеными латунными и латунными.

Рассмотрим теорию и методику расчета оптимальных размеров изгибаемой части контактного упругого элемента электрической розетки в виде плоской пружины [17, 18] с целью определения реактивного давления P между взаимодействующими цилиндрическими поверхностями и соответствующего ему минимально допустимого нормируемого усилия $[P_n]$ по ГОСТ Р 51322.1–2011 при номинальном токе до 10 А

$$[P_n] = 40 - 50H, \quad (1)$$

необходимого для размыкания соединения. Как отмечается в [13, 16], силовые характеристики P , $[P_n]$ являются важнейшими физико-механическими

¹ IEC TR 60083. Plugs and socket-outlets for domestic and similar general use standardized in member countries of IEC. 2015. 13 p.

параметрами, определяющими стабильность и надежность электрического контакта.

На рис. 1 изображен в упрощенной схематической интерпретации пример конструкции розетки типа С (EU Type C) и типа F (EU Type F), представляющей собой осесимметричную статически неопределимую систему, обладающую повышенной жесткостью и прочностью [19–21].

Следует указать, что конструктивно разъемы F (EU Type F) и C (EU Type C) отличаются только наличием заземления, поэтому с точки зрения математического моделирования контакта «штырь – гнездовой разъем» далее в тексте статьи эти два типа разъемов не разделяются.

Кроме того, представленная расчетная модель (см. рис. 1) применима к любому электрическому разъемному контактному соединению, то есть является универсальной. На схемах рис. 1 используются следующие буквенные обозначения:

$h_k, b_k, L - l_x$ — размеры деформируемых (изгибаемых) участков розетки;

l_x — длина полухорды окружности радиуса $R_b = 2$ мм штыря вилки диаметром $d_b = 2R_b = 4$ мм и длиной 18 мм;

b_k — линейные размеры поверхности контакта;

f — максимальное перемещение граничных точек А, расположенных на вертикальной оси симметрии, при введении штыря вилки в гнездо розетки, которое тождественно смещению центров С (см. рис. 1, а) двух окружностей, имеющих радиусы R_b ;

P — равнодействующая контактного давления;

$M_o, P/2$ — соответственно, изгибающий момент и опорная реакция в жестко защемленном сечении;

P_ξ — сила трения при скольжении штыря вилки по соприкасающейся контактной части розетки, для определения которой используем формулу [22, 23], широко применяемую в инженерных расчетах:

$$P_\xi = \xi P = 0,1P, \quad (2)$$

где $\xi = 0,1$ — коэффициент трения стали по бронзе [22, 24] при качественно обработанных и гладких поверхностях контакта.

Учитывая, что стандартная вилка имеет два штыря и четыре цилиндрических поверхности силового соприкосновения (см. рис. 1), то следует очевидное соотношение

$$4P_\xi = 4\xi P = [P_H] \Rightarrow P = P_H / 4\xi, \quad (3)$$

имеющее определенное численное значение

$$P = 100 - 125 \text{ Н} \quad (4)$$

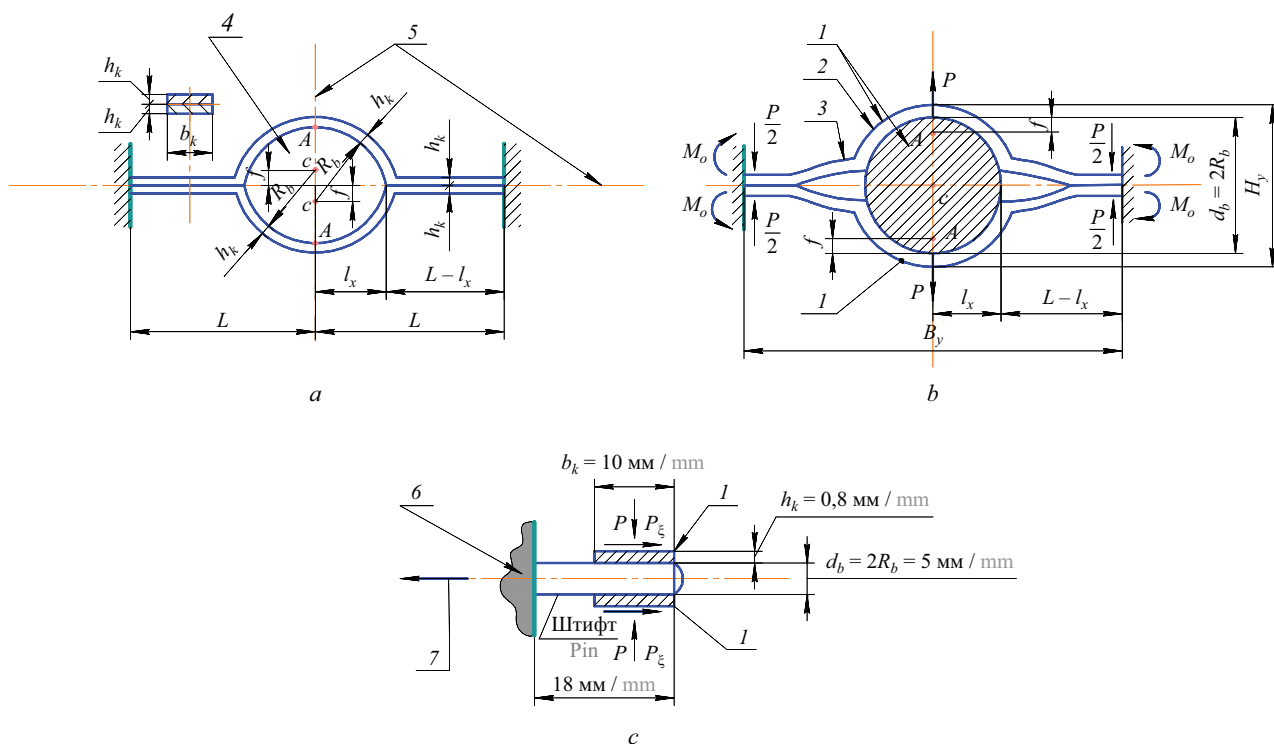


Рис. 1. Принципиальная расчетная схема гнездового контакта розетки: а — до нагружения силовой равнодействующей P ; б — после включения вилки, когда $P > 0$; в — взаимное расположение штыря и гнездового контакта; 1 — недеформируемые части; 2 — стальной штырь вилки; 3 — изгибаемые прямолинейные участки, включающие четыре плоских пружины; 4 — отверстие для штыря вилки; 5 — оси симметрии; 6 — корпус вилки; 7 — направление извлечения вилки

Fig. 1. Principal design diagram of the socket contact: а — before applying the force equal to P ; б — after inserting the plug, when $P > 0$; в — mutual arrangement of the pin and the socket contact; 1 — non-deformable parts; 2 — the steel plug pin; 3 — bending straight sections, including four flat springs; 4 — the hole for the plug pin; 5 — the axis of symmetry; 6 — the plug case; 7 — direction of the plug extraction

для контактирующей пары «сталь – бронза» согласно (1) и (2).

В основу математической аппроксимации напряженно-деформированного состояния контактирующих деталей гнездового контакта 3 розетки (см. рис. 1) принимаем расчетную статически неопределимую модель с абсолютно жесткой цилиндрической центральной частью 1 (см. рис. 2) и классические предпосылки линейной технической теории малого поперечного изгиба [18, 19, 21, 24, 26, 27].

Принятые допущения:

1) деформируемый материал конструкции — однородный, сплошной, изотропный и подчиняется закону Гука, а ее собственный вес пренебрежимо мал;

2) геометрические характеристики h_k, b_k, L, l_x, R_b не изменяются при нагружении механической системы (см. рис. 1, 2) реактивной силой P ;

3) наибольший прогиб f в сечении $x = L - l_x$ и угол поворота $\theta_{\max}^0$ при $x = 0,5(L - l_x)$ участков длиной $L - l_x$ находятся в пределах [20, 21, 25]

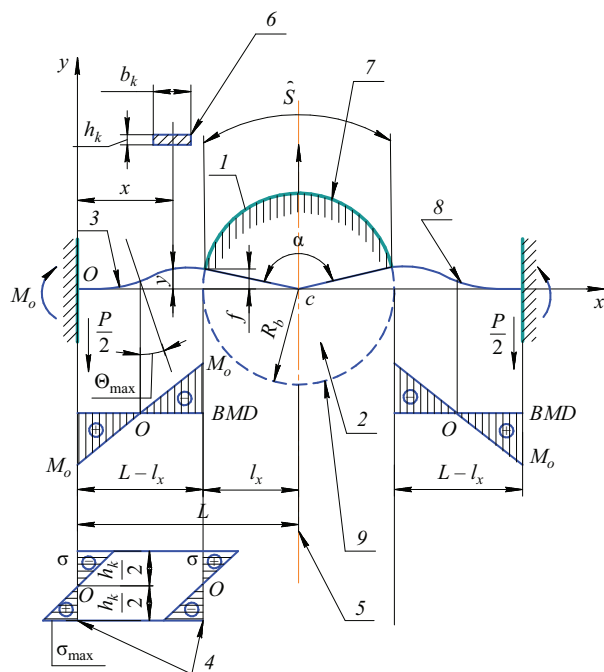


Рис. 2. Расчетная схема оценки несущей способности контактного пружинного элемента 3 розетки: 1 — абсолютно жесткая часть; 2 — недеформируемая область круглого поперечного сечения штыря розетки; 3 — изгибаемые участки; 4 — равноопасные сечения $x = 0$ и $x = L - l_x$; 5 — ось симметрии; 6 — сечение плоской пружины; 7 — недеформируемая дуга длиной S ; 8 — точка перегиба; 9 — абсолютно жесткий периметр штыря вилки

Fig. 2. Design diagram for assessing the bearing capacity of contact spring element 3 of the socket: 1 — the absolutely rigid part; 2 — the non-deformable area of the circular cross-section of the socket pin; 3 — bending sections; 4 — equally dangerous sections $x = 0$ and $x = L - l_x$; 5 — the axis of symmetry; 6 — the section of a flat spring; 7 — the non-deformable arc, having length S ; 8 — the inflection point; 9 — the absolutely rigid perimeter of the plug pin

$$f \leq 0,2(L - l_x), \quad (5)$$

$$\theta_{\max}^0 \leq 20-30^\circ, \quad (6)$$

и в результате можно не учитывать горизонтальные перемещения, по сравнению с f . При этом становится очевидным, что для выполнения допущения 2 при соблюдении (5), (6), необходимо ввести дополнительное ограничение

$$f \ll R_b, \quad (7)$$

вытекающее из конструктивных особенностей недеформированной схемы рис. 1, а, соответствующей давлению $P = 0$.

4) соблюдаются два соотношения между линейными размерами h_k, b_k, L, l_x :

$$\frac{h_k}{b_k} \leq \frac{1}{4}, \quad \frac{h_k}{L - l_x} \leq \frac{1}{4}; \quad (8)$$

5) выполняются три балочные гипотезы Кирхгофа – Лява:

- о плоском поперечном сечении до и после деформации;
- о нерастяжимости нейтральной оси, где нормальные напряжения $\sigma = 0$;
- об отсутствии давления между продольными слоями балки-пластинки, параллельными ее срединной плоскости.

Для расчета на жесткость и прочность плоских пружинных пластин 3 (см. рис. 1, 2) при малых перемещениях (5), (6) и нормальной температуре используем известное в сопротивлении материалов [17, 18, 20] соотношение:

$$\frac{d^2 y}{dx^2} = \frac{12(1 - \mu^2) M}{Eb_k h_k^3}; \quad (9)$$

$$\sigma_{\max} = \frac{6M_{\max}}{b_k h_k^2} \leq [\sigma] = \frac{\sigma_T}{n_T}, \quad (10)$$

где $y = y(x)$ — функция вертикальных перемещений; $M = M(x)$ — изгибающий момент в зависимости от x ;

$$M = M(x) = M_o - \frac{P}{2} x, \quad 0 \leq x \leq L - l_x; \quad (11)$$

$M_{\max}, \sigma_{\max}$ — наибольшие абсолютные значения переменных $M(x)$ и нормального напряжения $\sigma = \sigma(x, y)$ в наиболее удаленных от нейтрального слоя точках $y = \pm \frac{h_k}{2}$ равноопасных сечений $x = 0$,

$x = L - l_x$ (см. рис. 2);

$E, \mu, \sigma_T, n_T = 2; [\sigma]$ — соответственно, модуль упругости, коэффициент Пуассона, предел текучести материала, нормативный минимально до-

пустимый коэффициент запаса прочности, допускаемое напряжение, в пределах которого пружинные элементы 3 розетки (см. рис. 1) будут испытывать только упругие деформации.

Например, для изгибаемых участков 3 (см. рис. 2) из бериллиевой бронзы

$$E = 135\,000 \text{ МПа}, \sigma_T = 1280 \text{ МПа}, \mu = 0,32, \quad (12)$$

$$[\sigma] = \frac{\sigma_T}{n_T} = \frac{1280}{2} = 640 \text{ МПа}. \quad (13)$$

Продолжая решение, интегрируем дважды [27] линейное неоднородное дифференциальное уравнение (9) после подстановки функционального соотношения (11):

$$\frac{d_y}{d_x} = \theta = \frac{12(1-\mu^2)}{Eb_k h_k^3} \left(M_o x - \frac{Px^2}{4} \right) + C_1, \quad (14)$$

$$y = \int \theta dx = \frac{12(1-\mu^2)}{Eb_k h_k^3} \left(M_o \frac{x^2}{2} - P \frac{x^3}{12} \right) + C_1 x + C_2, \quad (15)$$

где $\theta = \theta(x)$ — угол поворота произвольного поперечного сечения x (в радианах);

C_1, C_2, M_o — постоянные, которые вычисляем из кинематических граничных условий (см. рис. 2).

$$\left. \begin{aligned} \theta(0) = 0, &\Rightarrow C_1 = 0, \\ y(0) = 0, &\Rightarrow C_2 = 0, \\ \theta(x)|_{x=L-l_x} = 0, &\Rightarrow M_o = P(L-l_x)/4 = M_{\max}. \end{aligned} \right\} \quad (16)$$

При $x = 0$ и $x = L - l_x$.

Учитывая результаты (16), представляем в окончательном виде функции $\theta(x), y(x)$ (15), (16) и их экстремумы $\theta_{\max}$ — в радианах, $\theta_{\max}^\circ$ — в градусах для точки $x = 0,5 (L - l_x)$ перегиба кривой $y(x)$ и $f = \max$, когда $x = L - l_x$ (см. рис. 2):

$$\left. \begin{aligned} \theta = \theta(x) &= \frac{3(1-\mu^2)P}{Eb_k h_k^3} (L - l_x - x)x, \\ y = y(x) &= \frac{(1-\mu^2)P}{2Eb_k h_k^3} [3(L - l_x) - 2x]x^2, \end{aligned} \right\} \quad (17)$$

$$\theta_{\max} = \frac{3(1-\mu^2)P}{4Eb_k h_k^3} (L - l_x)^2, \Rightarrow \theta_{\max}^\circ = \theta_{\max} \frac{180}{\pi}. \quad (18)$$

$$f = \frac{(1-\mu^2)P}{2Eb_k h_k^3} (L - l_x)^3. \quad (19)$$

Заменяя $M_{\max}$, согласно (16), в условии прочности (10), записываем его в виде предельного равенства

$$\frac{3P(L-l_x)}{2b_k h_k^2} = \frac{\sigma_T}{n_T}, \quad (20)$$

которое позволяет оценивать конструктивные параметры розетки с учетом требований ГОСТ Р 51322.1–2011 и ГОСТ 30988.2.6–2012.

После определения конструктивных характеристик розетки из равенства (20) появляется возможность найти численную величину длины дуги S половины поверхности взаимодействия одного штыря вилки с недеформируемой контактной частью l розетки (см. рис. 1)

$$S = \frac{\pi R_b \alpha}{180} = \frac{\pi R_b}{90} \arccos \frac{f}{R_b}, \quad (21)$$

где α — центральный угол в градусах

$$\alpha = 2 \arccos \frac{f}{R_b}. \quad (22)$$

Также на основании (20) возможно определить общую площадь контакта

$$F_k = 2Sb_k, \quad (23)$$

что представляется важнейшим фактором оценки надежности и безопасности работы розетки в процессе эксплуатации. Вполне очевидно, что из сравнения фактической площади контакта с нормируемой будет получен вывод о безопасности контактного соединения.

Кроме того, можно выразить через угол α длину полухорды l_x (см. рис. 1, 2)

$$l_x = R_b \sin \frac{\alpha}{2} = R_b \sin \left(\arccos \frac{f}{R_b} \right), \quad (24)$$

в зависимости от R_b, f , и в этом случае становится возможным установить ориентировочную величину габаритных размеров (см. рис. 1)

$$B_y = 2L, H_y = 2(R_b + h_k) \quad (25)$$

контактного устройства розетки при подобранных значениях геометрических параметров $L - l_x, h_k$, известном радиусе R_b и заданном экстремальном прогибе f .

Результаты и их обсуждение

Согласно ГОСТ 25866–83 «Эксплуатация техники. Термины и определения» условия эксплуатации — это совокупность факторов, действующих на изделие при его эксплуатации. К внешним факторам, действующим на изделие в процессе эксплуатации, относятся природные условия, тепловые, хими-

ческие и механические воздействия, запыленность, влажность и т.д. В работе [10] приведены различные примеры повреждений гнездовых контактов розеток. Но далеко не всегда воспламенение розетки сопровождается яркими и очевидными примерами автора [10]. Например, в результате многократного извлечения и вставления вилки в розетку или использования ненадлежащей вилки происходит ослабление контакта или утрата его несущей способности, сопровождающиеся увеличением радиуса гнездового контакта R_b (см. рис. 1, 3, 4, *c*). Следствием становится нагрев и воспламенение корпуса розетки, вилки, изоляции кабеля (см. рис. 3, *a*).

Выше показано, что формула (20) позволяет оценивать конструктивные параметры розетки (см. рис. 1, 2, 4). Например, конструктивно параметр $L - l_x = 3$ мм (см. рис. 4, *a*), а фактически он больше (см. рис. 4, *b*). Тогда по формуле (20) получаем, что нормативный минимально допустимый коэффициент запаса прочности не обеспечивается, что свидетель-

ствует об утрате несущей способности гнездового контакта и наличии пожароопасного режима.

Необходимо отметить, что в работах [6, 8, 9] помимо экспериментальных данных о температуре в розетках, достигающей 650–900 °С, указывается на такой фактор, как окисление контактов. На рис. 3, *b* и 4, *c* показано наличие на поверхности гнездовых контактов оксидных пленок. Приведем сравнительные данные по поверхности гнездовых контактов розетки, бывшей в эксплуатации и оплавившейся в результате утраты несущей способности одного из контактов (см. рис. 4, *c*, табл. 1, 2). Следует подчеркнуть, что один из контактов имеет оксидную пленку (см. табл. 2), а второй — нет (см. табл. 1). Необходимо отметить, что на контакте с оксидной пленкой визуально обнаруживаемых повреждений поверхности в виде сквозных проплавлений, капель металла и т.п. нет. Из табл. 1 следует, что контакт выполнен из латуни, при этом содержание меди составляет 57–59 %, а цинка — 35–37 %. Из табл. 2

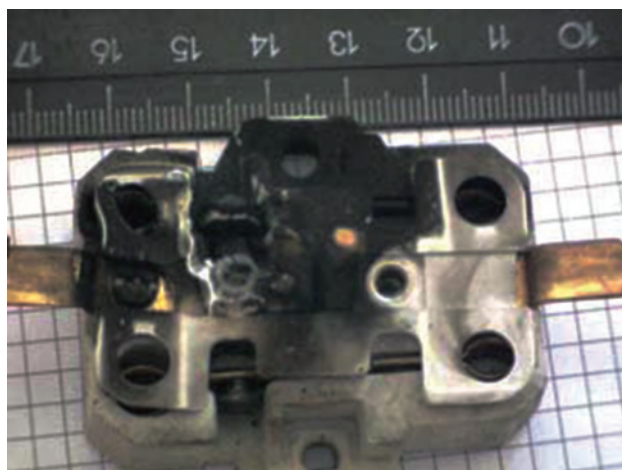
*a**b*

Рис. 3. Эксплуатационные повреждения розетки: *a* — термические повреждения корпуса розетки; *b* — увеличение радиуса R_b , что обуславливает утрату несущей способности гнездового контакта

Fig. 3. The socket damaged in the course of operation: *a* — a thermally damaged socket case; *b* — an increase in radius R_b , which causes the loss of the bearing capacity of the socket contact

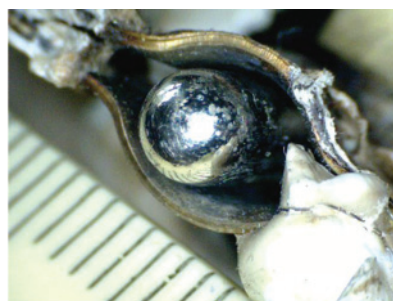
*a**b**c*

Рис. 4. Варианты несущей способности гнездового контакта розетки: *a* — обеспеченная несущая способность; *b* — необеспеченная несущая способность; *c* — сравнительный пример увеличения радиуса R_b

Fig. 4. Options of the bearing capacity of the socket contact: *a* — available bearing capacity; *b* — unavailable bearing capacity; *c* — a comparative example of growing radius R_b

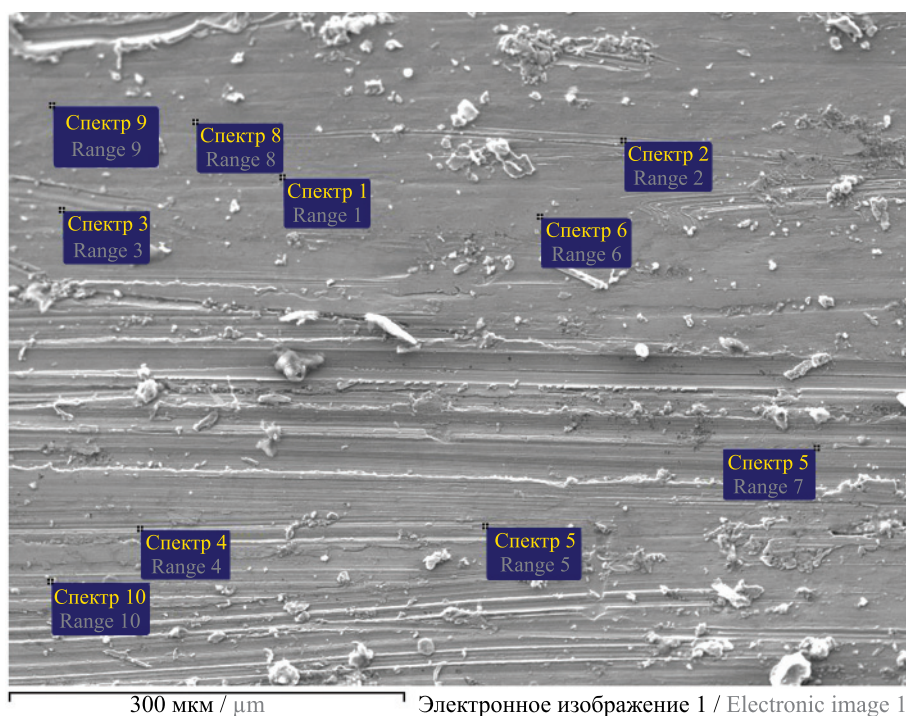


Рис. 5. Точки микроанализа на поверхности контакта без ярко выраженной оксидной пленки

Fig. 5. Points of the microanalysis on the contact surface that has no clearly identified oxide film

Таблица 1. Результаты микроанализа участка на рис. 5

Table 1. Results of the microanalysis of the section shown in Fig. 5

Номер точки измерения Measurement point number	Содержание химического элемента, % мас. Chemical element content, % by mas.			
	O	Cl	Cu	Zn
Спектр 1 / Range 1	3,87	0,83	58,68	36,62
Спектр 2 / Range 2	4,80	1,36	58,13	35,71
Спектр 3 / Range 3	2,62	0,45	59,93	37,00
Спектр 4 / Range 4	7,35	1,53	56,46	34,66
Спектр 5 / Range 5	3,70	1,19	58,57	36,54
Спектр 6 / Range 6	4,78	2,44	57,05	35,73
Спектр 7 / Range 7	3,61	1,08	58,12	37,19
Спектр 8 / Range 8	3,32	0,99	57,77	37,92
Спектр 9 / Range 9	2,55	0,51	58,51	38,42
Спектр 10 / Range 10	3,74	1,65	57,44	37,17

следует, что на поверхности контакта содержание меди падает до 16–21 % при возрастании доли цинка до 40–51 %. Поскольку температуры плавления и кипения цинка составляют, соответственно, 419,5 и 907 °С, то это свидетельствует о выделении металла на поверхность при температуре, близкой к его температуре кипения. Наличие на поверхности контакта железа и марганца свидетельствует о переносе материала со штыря вилки при электродуговом процессе.

В работе [9] приведены данные, что поливинилхлоридная (ПВХ) изоляция начинает терять

изоляционные свойства при 70 °С, пластически деформируется при 92 °С, разлагается при 140 °С и плавится при 160 °С.

Полученные результаты хорошо объясняют статистические данные [4, 5], свидетельствующие, что возгорания шнуров и вилок в США составляют 17,2 % от общего числа пожаров. Но это вполне очевидно, что нагретый до 420–900 °С гнездовой контакт вызовет деградацию изоляции шнура и ее воспламенение.

Необходимо напомнить, что поверхность электрического контакта, покрытая оксидными пленками, обладает большим электрическим сопротивлением,

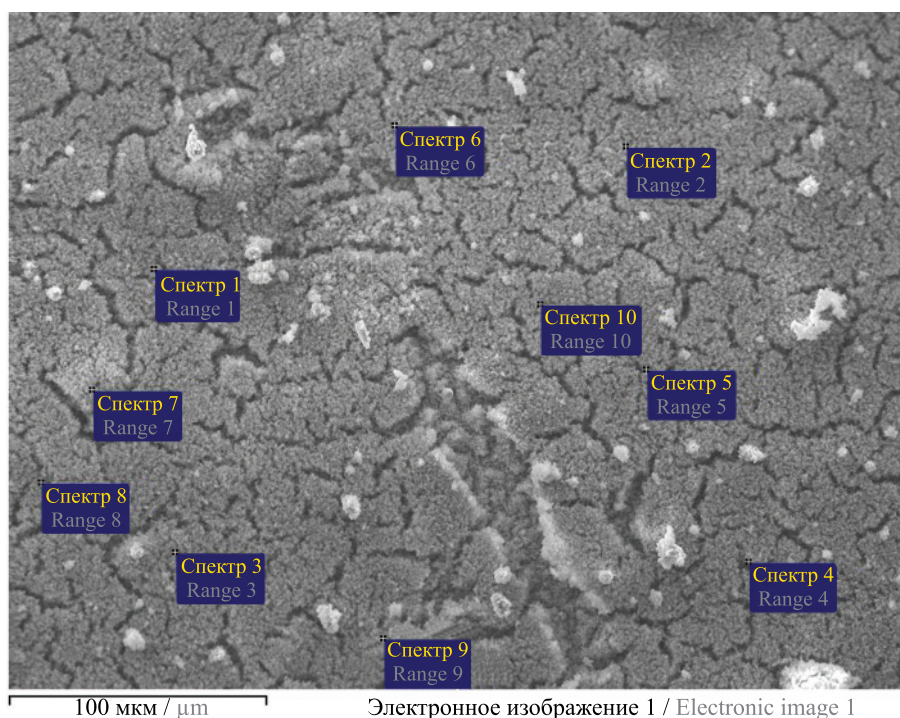


Рис. 6. Точки микроанализа на поверхности контакта с ярко выраженной оксидной пленкой

Fig. 6. Points of the microanalysis on the contact surface that has a clearly identified oxide film

Таблица 2. Результаты микроанализа участка на рис. 6

Table 2. Results of the microanalysis of the section shown in Fig. 6

Точки измерения Measurement point	Содержание химического элемента, % мас. Chemical element content, % by mas.							
	O	Mn	Cl	Si	Fe	Cu	Ca	Zn
Спектр 1 / Range 1	27,97	1,98	2,70	1,53	2,49	16,72	1,53	43,74
Спектр 2 / Range 2	27,44	1,78	1,88	1,05	2,18	22,31	1,56	41,81
Спектр 3 / Range 3	21,38	2,12	1,63	1,06	3,23	16,97	1,27	52,34
Спектр 4 / Range 4	27,31	1,84	2,28	1,32	2,48	16,47	1,73	46,56
Спектр 5 / Range 5	12,66	2,18	2,65	0,81	3,00	24,41	1,88	52,41
Спектр 6 / Range 6	27,16	1,67	2,13	0,96	2,16	23,25	1,30	40,92
Спектр 7 / Range 7	30,94	1,88	2,43	1,17	2,55	16,42	3,29	41,32
Спектр 8 / Range 8	16,86	2,03	2,02	1,27	3,16	16,12	2,10	56,45
Спектр 9 / Range 9	20,23	2,02	1,86	1,45	3,19	19,42	1,69	50,14
Спектр 10 / Range 10	17,25	1,73	2,06	0,76	3,11	21,70	1,83	51,55

поскольку удельное сопротивление оксидов на несколько порядков выше удельного сопротивления чистых металлов [28, 29]. В частности, если для меди удельное электрическое сопротивление при 0 °C составляет $1,68 \cdot 10^{-8}$ Ом·м, то для оксида меди (CuO) — от 1 до 10 Ом·м, а для закиси меди (Cu₂O) от 10^6 до 10^7 Ом·м. В работе [9] экспериментально доказано, что каждое повторение процесса нагрева контакта вызывает увеличение как контактного сопротивления, так и температуры, что обусловлено ростом толщины оксидной пленки.

Предлагается следующий алгоритм использования предлагаемой математической модели. Получив объект исследования, специалист измеряет параметры ($L - l_x$), b_k , h_k (см. рис. 1), а затем, используя формулы (20), (23), оценивает несущую способность гнездового контакта и потенциальное наличие пожароопасного режима. В случае неудовлетворительной несущей способности следует провести микроанализ на контактных поверхностях с целью фиксации криминалистически значимых признаков пожароопасного режима.

Таким образом, в результате применения расчетного метода и растровой микроскопии при исследо-

вании гнездового контакта розетки можно установить криминалистически значимые признаки, позволяющие установить причинную связь между утратой контактом несущей способности и пожаром.

В заключение необходимо отметить, что, по мнению И.Д. Чешко [14], использование результатов инструментальных исследований в качестве «промежуточного продукта» в экспертном исследовании по пожару не снижает их ценности как важнейшего источника объективной информации, без которой выводы о причине пожара будут малоубедительными.

Выводы

Примерами из практики наглядно проиллюстрировано, что в гнездовых контактах розеток в процессе длительной эксплуатации имеет место утрата несущей способности контакта, что ведет к его нагреву, росту толщины оксидной пленки, и, в конечном счете, к возгоранию вилки, шнура, корпуса розетки.

Проанализировано силовое взаимодействие между штырем вилки и гнездовым контактом розетки

по всей рабочей криволинейной поверхности в связи со специфическими особенностями конструкции.

Дана оценка повышенной упругости и малой деформируемости пружинной системы «розетка – вилка», при этом решение доведено до простых расчетных формул, позволяющих оценивать несущую способность контактов розетки.

Методом растровой микроскопии доказано наличие криминалистически значимого признака в виде оксидной пленки на поверхности контакта.

Проиллюстрирована возможность применения разработанной математической модели для проведения исследования гнездового контакта в рамках пожарно-технической экспертизы.

Полученные результаты могут быть использованы при экспертном исследовании гнездовых контактов, изымаемых с мест пожаров, установления механизма их повреждения и, в конечном счете, причины пожара. В свою очередь, знание технической причины пожара даст возможность разработать профилактические мероприятия и конструктивные решения, направленные на ее устранение.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Брушлинский Н.Н., Соколов С.В. Какова «стоимость» пожаров в современном мире? // Пожаровзрывобезопасность/Fire and Explosion Safety. 2020. Т. 29. № 1. С. 79–88. DOI:10.18322/PVB.2020.29.01.79-88
2. Quintiere J.G. Front Matter. Fundamentals of fire phenomena. England, Chichester : John Wiley and Sons Ltd., 2006. DOI: 10.1002/0470091150.fmatter
3. Babrauskas V. Arc mapping: a critical review // Fire Technology. 2018. Vol. 54. Issue 3. Pp. 749–780. DOI: 10.1007/s10694-018-0711-5
4. Babrauskas V. Fires originating in branch-circuit NM cables due to installation damage // Journal of Fire Sciences. 2018. Vol. 36. Issue 5. Pp. 438–450. DOI: 10.1007/0734904118785920
5. Babrauskas V. Electrical Fires // SFPE Handbook of Fire Protection Engineering, 5th ed. New York : Springer, 2016. Pp. 662–704.
6. Ferrino-McAllister J.L., Roby R.J., Milke J.A. Heating at electrical contacts: characterizing the effects of torque, contact area, and movement on the temperature of residential receptacles // Fire Technology. 2006. Vol. 42. Issue 1. Pp. 49–74. DOI: 10.1007/s10694-005-3734-7
7. Korinek C.W., Korinek T.C., Lopez H.F. Pre and post-flashover characteristics of an electrically overheated poor connection between copper and steel // Fire and Materials, San Francisco, CA, 2013.
8. Benfer M., Gottuk D. Electrical receptacles — Overheating, arcing, and melting // Fire Safety Science. 2014. Vol. 11. Pp. 1010–1023. DOI: 10.3801/IAFSS.FSS.11-1010
9. Hadziefendic N., Davidovic M., Djordjevic V., Kostic M. The impact of an incomplete overlap of a copper conductor and the corresponding terminal on the contact temperature // IEEE Transactions on Components, Packaging and Manufacturing Technology. 2017. Vol. 7. Issue 10. Pp. 1644–1654. DOI: 10.1109/TCPMT.2017.2720421
10. Егоров А.А. Отличие между эксплуатационным и аварийным разрушением электрических штепсельных контактов при экспертизе пожаров // Надзорная деятельность и судебная экспертиза в системе безопасности. 2020. № 4. С. 21–29. URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=44430191>
11. Shea J.J. Identifying causes for certain types of electrically initiated fires in residential circuits // Fire and Materials. 2011. Vol. 35. Issue 1. Pp. 19–42. DOI: 10.1002/fam.1033
12. Müller P., Tenbohlen S., Maier R. Current characteristics of serial and parallel low current arc faults in distribution networks // Proc. CIRED. Frankfurt, Germany, 2011. P. 0181.
13. Kharin S.N. Mathematical models of phenomena in electrical contacts : monograph. A.P. Ershov Institute of Informatics system, Siberian Branch of RAS, 2017. 193 p. URL: https://www.iis.nsk.su/files/book/file/Kharin_math_models.pdf

14. Чешко И.Д., Плотников В.Г. Анализ экспертных версий возникновения пожара. СПбФ ФГУ ВНИИПО МЧС России. Кн. 1. СПб. : Типография «Береста», 2010. 708 с.
15. Смелков Г.И. Пожарная безопасность электропроводок. М. : Кабель, 2009. 328 с.
16. Волкова О.Г., Жорняк Л.Б. Исследование характера механического взаимодействия рабочих поверхностей силовых разрывных контактов // *Электротехника і Електромеханіка*. 2016. № 1. С. 12–16. DOI: 10.20998/2074-272X.2016.1.02
17. Андреева Л.Е. Упругие элементы приборов / под ред. В.И. Феодосьева. М. : Машгиз, 1962. 456 с.
18. Пономарев С.Д., Андреева Л.Е. Расчет упругих элементов машин и приборов. М. : Машиностроение, 1980. 326 с.
19. Избранные задачи по строительной механике и теории упругости (регулирование, синтез, оптимизация) / под ред. Н.П. Абовского. М. : Стройиздат, 1978. 189 с.
20. Тимошенко С.П., Гере Дж. Механика материалов / пер. с англ. 2-е изд. СПб. : Лань, 2002. 672 с.
21. Биргер И.А., Мавлютов Р.Р. Сопротивление материалов : учеб. пособие. М. : Наука, 1986. 560 с.
22. Стрелков С.П. Механика. М. : Наука, 1975. 560 с.
23. Биргер И.А., Шорр Б.Ф., Иосилевич Г.Б. Расчет на прочность деталей машин : справочник. М. : Машиностроение, 1979. 702 с.
24. Самуль В.И. Основы теории упругости и пластичности : учеб. пособие для инженерно-строительных специальностей вузов. М. : Высшая школа, 1970. 288 с.
25. Попов Е.П. Теория и расчет гибких упругих стержней. М. : Наука, 1986. 296 с.
26. Серенсен С.В., Козаев В.П., Шнейдерович Р.М. Несущая способность и расчеты деталей машин на прочность: Руководство и справочное пособие / под ред. С.В. Серенсена. М. : Машиностроение, 1975. 488 с.
27. Бронштейн И.Н., Семендяев К.А. Справочник по математике для инженеров и учащихся втузов. 13-е изд., исправл. М. : Наука, 1986. 544 с.
28. Правила устройства электроустановок. Все действующие разделы шестого и седьмого изданий с изменениями и дополнениями. Новосибирск : Норматика, 2018. 462 с.
29. Chalyi A.M., Dmitriev V.A., Pavleino M.A., Pavleino O.M. Heating of high current electric contacts under short-circuit shock currents // *Surface Engineering and Applied Electrochemistry*. 2013. Vol. 49. Issue 5. Pp. 433–439. DOI: 10.3103/S1068375513050025

REFERENCES

1. Brushlinskiy N.N., Sokolov S.V. How much is the fire “cost” in the modern world? *Pozharovzryvbezopasnost/Fire and Explosion Safety*. 2020; 29(1):79-88. DOI: 10.18322/PVB.2020.29.01.79-88 (rus).
2. Quintiere J.G. *Front Matter: Fundamentals of fire phenomena*. England, Chichester, John Wiley and Sons Ltd, 2006. DOI: 10.1002/0470091150.fmatter
3. Babrauskas V. Arc mapping: a critical review. *Fire Technology*. 2018; 54(3):749-780. DOI: 10.1007/s10694-018-0711-5
4. Babrauskas V. Fires originating in branch-circuit NM cables due to installation damage. *Journal of Fire Sciences*. 2018; 36(5):438-450. DOI: 1177/0734904118785920
5. Babrauskas V. Electrical Fires. *SFPE Handbook of Fire Protection Engineering, 5th ed.* New York, Springer, 2016; 662-704.
6. Ferrino-McAllister J.L., Roby R.J., Milke J.A. Heating at electrical contacts: characterizing the effects of torque, contact area, and movement on the temperature of residential receptacles. *Fire Technology*. 2006; 42(1):49-74. DOI: 10.1007/s10694-005-3734-7
7. Korinek C.W., Korinek T.C., Lopez H.F. Pre and Post-flashover characteristics of an electrically overheated poor connection between copper and steel. *Fire and Materials*. San Francisco, CA, 2013.
8. Benfer M., Gottuk D. Electrical receptacles — Overheating, arcing, and melting. *Fire Safety Science*. 2014; 11:1010-1023. DOI: 10.3801/IAFSS.FSS.11-1010
9. Hadziefendic N., Davidovic M., Djordjevic V., Kostic M. The impact of an incomplete overlap of a copper conductor and the corresponding terminal on the contact temperature. *IEEE Transactions on Components, Packaging and Manufacturing Technology*. 2017; 7(10):1644-1654. DOI: 10.1109/TCP-MT.2017.2720421
10. Egorov A.A. The difference between operational and emergency destruction of electrical plug contacts during the examination of fires. *Monitoring and expertise in safety engineering*. 2020; 4:21-29. (rus). URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=44430191>
11. Shea J.J. Identifying causes for certain types of electrically initiated fires in residential circuits. *Fire and Materials*. 2011; 35(1):19-42. DOI: 10.1002/fam.1033

12. Müller P., Tenbohlen S., Maier R. Current characteristics of serial and parallel low current arc faults in distribution networks. *Proc. CIGRE*. Frankfurt, Germany, 2011; 0181.
13. Kharin S.N. *Mathematical models of phenomena in electrical contacts : monograph*. A.P. Ershov Institute of Informatics system, Siberian Branch of RAS, 2017; 193. URL: https://www.iis.nsk.su/files/book/file/Kharin_math_models.pdf
14. Cheshko I.D., Plotnikov V.G. *Analysis of expert versions of fire occurrence*. SPbF FGU VNIPO EMERCOM of Russia. Book 1. St. Petersburg, Beresta LLC Publ., 2010; 708. (rus).
15. Smelkov G.I. *Fire safety of wirings*. Moscow, Cable LLC. Publ., 2009; 328. (rus).
16. Volkova O.G., Zhorniyak L.B. Study of the nature of the mechanical interaction of the working surfaces of high-current breaking contacts. *Electrical Engineering and Electromechanics*. 2016; 1:12-16. DOI: 10.20998/2074-272X.2016.1.02 (rus).
17. Andreeva L.E. *Elastic elements of devices*. V.I. Feodosyev (ed.). Moscow, Mashgiz Publ., 1962; 456. (rus).
18. Ponomarev S.D., Andreeva L.E. *Calculation of elastic elements of machines and devices*. Moscow Mashinostroyeniye Publ, 1980; 326. (rus).
19. *Selected problems in structural mechanics and elasticity theory (regulation, synthesis, optimization)*. N.P. Abovsky (ed.). Moscow, Stroyizdat Publ, 1978; 189. (rus).
20. Gere J.V., Timoshenko S.P. *Mechanics of materials*. 3rd ed. London, Chapman & Hall, 1991; 807. DOI: 10.1007/978-1-4899-3124-5
21. Birger I.A., Mavlyutov R.R. *Resistance of Materials : A Tutorial*. Moscow, Nauka Publ, 1986; 560. (rus).
22. Strelkov S.P. *Mechanics*. Moscow, Nauka Publ, 1975; 560. (rus).
23. Birger I.A., Shorr B.F., Iosilevich G.B. *Strength calculation of machine parts : Handbook*. Moscow, Mashinostroyeniye Publ, 1979; 702. (rus).
24. Samul V.I. *Fundamentals of the theory of elasticity and plasticity : Textbook for engineering and construction specialties of universities*. Moscow, Vysnaya shkola Publ, 1970; 288. (rus).
25. Popov E.P. *Theory and calculation of flexible elastic rods*. Moscow, Nauka Publ., 1986; 296. (rus).
26. Serensen S.V., Kogaev V.P., Shneiderovich R.M. *Bearing capacity and strength calculations of machine parts : Manual and reference manual*. S.V. Serensen (ed.). Moscow, Mashinostroyeniye Publ, 1975; 488. (rus).
27. Bronshteyn I.N., Semendyaev K.A. *Mathematics handbook for engineers and students in higher technical education. 13th ed*. Moscow, Nauka Publ., Fizmatgiz Publ., 1986; 544. (rus).
28. *Rules of arrangement of electrical installations*. Novosibirsk, Normatika Publ., 2018; 462. (rus).
29. Chalyi A.M., Dmitriev V.A., Pavleino M.A., Pavleino O.M. Heating of high current electric contacts under short-circuit shock currents. *Surface Engineering and Applied Electrochemistry*. 2013; 49(5):433-439. DOI: 10.3103/S1068375513050025

Поступила 21.10.2021, после доработки 15.11.2021; принята к публикации 01.12.2021
Received October 21, 2021; Received in revised form November 15, 2021; Accepted December 1, 2021

Информация об авторах

НЕДОБИТКОВ Александр Игнатьевич, канд. техн. наук, старший научный сотрудник, Восточно-Казахстанский технический университет им. Д. Серикбаева, Республика Казахстан, 070014, г. Усть-Каменогорск, ул. Серикбаева, 19; ORCID: 0000-0003-4605-9668; e-mail: a.nedobitkov@mail.ru

АБДЕЕВ Борис Масгутович, канд. техн. наук, профессор «Школы архитектуры, строительства и дизайна», Восточно-Казахстанский технический университет им. Д. Серикбаева, Республика Казахстан, 070014, г. Усть-Каменогорск, ул. Серикбаева, 19; ORCID: 0000-0002-7188-7599; e-mail: m.abdeeva@mail.ru

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

Information about the authors

Alexandr I. NEDOBITKOV, Cand. Sci. (Eng.), Senior Research, D. Serikbayev East Kazakhstan Technical University, Serikbayeva St., 19, Ust-Kamenogorsk, 070014, Republic of Kazakhstan; ORCID: 0000-0003-4605-9668; e-mail: a.nedobitkov@mail.ru

Boris M. ABDEYEV, Cand. Sci. (Eng.), Professor of Architectural and Civil Engineering Department, D. Serikbayev East Kazakhstan Technical University, Serikbayeva St., 19, Ust-Kamenogorsk, 070014, Republic of Kazakhstan; ORCID: 0000-0002-7188-7599; e-mail: m.abdeeva@mail.ru

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

ПОЖАРОВЗРЫВОБЕЗОПАСНОСТЬ/FIRE AND EXPLOSION SAFETY. 2022. Т. 31. № 1. С. 77–87
POZHAROVZRYVOBEZOPASNOST/FIRE AND EXPLOSION SAFETY. 2022; 31(1):77-87

НАУЧНАЯ СТАТЬЯ/RESEARCH PAPER

УДК 614.841.4

<https://doi.org/10.22227/0869-7493.2022.31.01.77-87>

Распространение пожара из открытой автостоянки, расположенной на первом этаже жилого здания

Ирек Равильевич Хасанов✉, Станислав Анатольевич Зуев,
Александр Анатольевич Абашкин, Анна Станиславовна Зуева

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. Проблема размещения автостоянок и парковочных мест актуальна во многих крупных городах, что приводит к необходимости оптимизации парковочного пространства. Одним из эффективных путей организации парковок на придомовой территории, помимо встроенных закрытых автостоянок, является устройство открытой парковки в первых этажах многоквартирных жилых домов. В связи с этим для оценки пожарной опасности такого проектного решения необходимо исследовать возможность распространения пожара из открытой автостоянки в первом этаже на вышележащие этажи и разработать обоснованные предложения по внедрению новых и оптимизации существующих противопожарных требований.

Цели и задачи. Целью настоящей работы является изучение особенностей распространения опасных факторов пожара на основе полевого моделирования при горении автомобилей в открытой автостоянке на первом этаже многоквартирного жилого дома и оценка возможности пожаробезопасного размещения таких автостоянок в жилых зданиях.

Методика. Для достижения цели исследования использовалось полевое (CFD) моделирование динамики пожара с использованием компьютерной программы FDS. При моделировании проведены расчеты распространения опасных факторов пожара из открытой автостоянки на 1-м этаже на вышележащие этажи жилого дома.

Результаты и их обсуждение. В результате моделирования развития пожара в автостоянке были получены распределения температур, задымления и тепловых потоков в различные моменты времени. Результаты расчетов позволили оценить эффективность применения различных видов противопожарных барьеров и определить их параметры для выполнения условия нераспространения пожара. В качестве наиболее оптимального решения определено устройство над проемом автостоянки негорючего козырька из огнестойких материалов. По результатам работы предложен комплекс необходимых противопожарных мероприятий, обеспечивающих возможность безопасного размещения открытых автостоянок легковых автомобилей в многоквартирных жилых зданиях.

Выводы. Исследование показало, что обеспечение пожарной безопасности многоквартирных жилых домов при размещении открытых одноуровневых автостоянок легковых автомобилей достигается путем применения огнестойких несущих и ограждающих строительных конструкций здания, использования негорючих материалов для облицовки, отделки фасада здания, а также устройства над проемами автостоянки выступающего из плоскости стены козырька, балкона или галереи.

Ключевые слова: полевое моделирование; опасные факторы пожара; встроенные автостоянки; предотвращение распространения пожара; противопожарные барьеры

Для цитирования: Хасанов И.Р., Зуев С.А., Абашкин А.А., Зуева А.С. Распространение пожара из открытой автостоянки, расположенной на первом этаже жилого здания // Пожаровзрывобезопасность/Fire and Explosion Safety. 2022. Т. 31. № 1. С. 77–87. DOI: 10.22227/0869-7493.2022.31.01.77-87

✉ Хасанов Ирек Равильевич, e-mail: irhas@rambler.ru

The spread of fire from an open car park on the ground floor of a residential building

Irek R. Khasanov✉, Stanislav A. Zuev, Aleksandr A. Abashkin, Anna S. Zueva

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 problem of car parks and parking spaces is relevant in many large cities, and it requires the optimization of parking spaces. The arrangement of open car parks on the ground floors of apartment buildings is an effective way to organize car parks in a house in addition to covered parking lots. In this regard, in order to assess the fire hazard of such a design solution, it is necessary to study the spreadability of fire from an open ground floor parking lot to upper floors and develop reasonable proposals for the development of new and optimization of effective fire safety requirements.

Goals and objectives. The goal of this work is to study the spread of fire hazards using the field modeling of the car burning process in an open parking lot on the ground floor of an apartment building and to assess the possibility of the fire safe arrangement of such parking lots in residential buildings.

Method. To achieve the purpose of the study, the field (CFD) modeling of the fire development pattern was performed using FDS computer software. In the course of modeling, the authors analyzed the spread of the fire hazard from an open parking lot, located on the ground floor, to the upper floors of a residential building.

Results and discussion. Temperature distributions, smoke and heat flows at various points in time were obtained as a result of modeling the development of fire in a parking lot. The results of calculations allowed to evaluate the effectiveness of various types of fire barriers and determine their parameters to meet the condition of the non-proliferation of fire. The most optimal solution is a non-combustible visor made of fire-resistant materials and installed above the opening leading to a parking lot. Given the results of the work, a set of necessary fire-fighting actions are proposed to ensure the possibility of arranging open parking lots in residential apartment buildings.

Conclusions. It is shown that the fire safety of residential apartment buildings that have open single-level parking lots is achievable in case of the use of fire-resistant bearing and enclosing building structures, non-combustible materials for cladding, finishing the facade of a building, as well as in the case of making a canopy, a balcony or a gallery above the opening that leads to the parking lot.

Keywords: field modeling; fire hazards; covered parking lots; fire prevention; fire barriers

For citation: Khasanov I.R., Zuev S.A., Abashkin A.A., Zueva A.S. The spread of fire from an open car park on the ground floor of a residential building. *Pozharovzryvobezopasnost/Fire and Explosion Safety*. 2022; 31(1): 77-87. DOI: 10.22227/0869-7493.2022.31.01.77-87 (rus).

✉ Irek Ravilevich Khasanov, e-mail: irhas@rambler.ru

Введение

В современной жилой застройке остро стоит вопрос размещения автостоянок и парковочных мест. Данная проблема актуальна для многих крупных городов, что приводит к задаче оптимизации парковочного пространства [1–3]. Подземные паркинги позволяют компактно размещать большое количество автомобилей, но при этом требуют значительных затрат на строительство и эксплуатацию в сравнении с открытыми наземными автостоянками. Одним из эффективных путей организации парковок является устройство открытой автостоянки (парковки) в первых этажах многоквартирных жилых домов. Такие паркинги по сравнению с подземными автостоянками проще и экономичнее с точки зрения строительства.

Основные требования строительной и пожарной безопасности для зданий и сооружений к стоянкам автомобилей, в том числе к объемно-планировочным и конструктивным решениям по размещению встроенных автостоянок в другие здания, содержатся в своде правил СП 113.13330.2016 «Стоянки автомобилей. Актуализированная редакция СНиП 21-02-99*»¹. При этом сооружение автостоянки может быть как закрытого типа с наружными сплошными огражда-

ющими конструкциями, так и открытого типа, в которой проемы на каждом ярусе (этаже) составляют не менее 50 % площади внешней поверхности наружных ограждений.

В своде правил СП 4.13130.2013 «Системы противопожарной защиты. Ограничение распространения пожара на объектах защиты. Требования к объемно-планировочным и конструктивным решениям»² указано, что автостоянки легковых автомобилей допускается встраивать в здания других классов функциональной пожарной опасности (за исключением зданий классов функциональной пожарной опасности Ф1.1, Ф4.1) I и II степеней огнестойкости и классов конструктивной пожарной опасности С0 и С1. При этом автостоянки должны иметь степень огнестойкости не менее степени огнестойкости здания, в которое они встраиваются, и отделяться от помещений (этажей) этих зданий противопожарными стенами и перекрытиями 1-го типа. В целях ограничения распространения пожара при встраивании открытых автостоянок в общественные здания следует обеспечить расстояние от проемов автостоянки до низа ближайших вышележащих оконных проемов здания другого назначения не менее 4 м или в радиусе 4 м над проемом, заполнение окон предусмотреть

¹ СП 113.13330.2016. Стоянки автомобилей. Актуализированная редакция СНиП 21-02-99* М.: Минстрой России, 2017. 24 с.

² СП 4.13130.2013. Системы противопожарной защиты. Ограничение распространения пожара на объектах защиты. Требования к объемно-планировочным и конструктивным решениям.

противопожарным либо предусмотреть над проемами автостоянки глухой козырек из негорючих материалов шириной не менее 1 м.

Аналогичные требования по отделению встроенных в здания парковок противопожарными преградами существуют в большинстве зарубежных стран. Так, согласно требованиям международного строительного кодекса International Building Code (IBC 2018), в многоквартирные жилые дома допускается встраивать автостоянки как закрытого, так и открытого типов при условии отделения от жилых этажей огнестойкими перекрытиями, соответствующими степени огнестойкости здания. Для предотвращения распространения пожара в зданиях более трех этажей указанным кодексом предусмотрено устройство наружных противопожарных преград. Так, если окна на вышележащем этаже выполнены не в противопожарном исполнении, то участки от проемов автостоянки до низа оконных проемов должны быть выполнены огнестойкими (междуэтажные пояса) не менее 0,91 м, либо отделены противопожарными барьерами (козырьками, балконами), выступающими по горизонтали не менее чем на 0,76 м.

Как видно из анализа нормативных требований, для предотвращения распространения пожара из открытой автостоянки по фасаду здания используются междуэтажные огнестойкие пояса или противопожарные козырьки различного конструктивного исполнения и размеров. Для оценки возможности пожаробезопасного размещения открытой автостоянки в первых этажах жилых многоквартирных домов целесообразно проводить исследования по моделированию пожаров при возгорании автомобилей, определять количественные характеристики опасных факторов пожара (ОФП) и оценивать их воздействие на вышерасположенные этажи здания.

Для моделирования распространения пожара по наружным строительным конструкциям используются математические модели различной сложности, например [4–7]. В работе [8] рассмотрены различные сценарии и теоретические модели распространения пожара по внешней поверхности здания. Отмечено, что численное моделирование актуально при исследовании параметров продуктов горения с учетом геометрии фасада здания и возможности перехода пожара на вышележащий этаж.

В настоящее время наиболее информативным и универсальным инструментом моделирования распространения ОФП является полевое (CFD) моделирование динамики пожара, основанное на решении системы дифференциальных уравнений Навье – Стокса, описывающих физико-химические явления при пожаре [9–11]. Для практического применения широкое распространение получил компьютерный код FDS [12], который также использовался в ряде

работ при исследовании распространения огня по наружным конструкциям здания и для сравнения экспериментальных и численных данных [13–16]. Так, в [13] представлены результаты экспериментальных и численных исследований воздействия пожара на фасад здания. Показано, что наиболее пожароопасная критическая зона на фасаде расположена над рассматриваемым проемом размером 1 м на 1,5 м, при этом наблюдались значения температуры до 500 °С.

Влияние геометрии фасадов и противопожарных барьеров на вертикальное распространение продуктов горения из оконного проема вдоль наружного фасада изучалось в работах [17–20]. В работе [17] представлены результаты полевого моделирования распространения огня по негорючим фасадам различной геометрической конфигурации. Результаты моделирования показали, что наряду с характеристиками пожарной опасности строительных конструкций конфигурация фасада также оказывает существенное влияние на температуру и ее распределение над горящим проемом офисного помещения. Численное моделирование влияния характеристик балконов на распространение ОФП на вышележащие этажи представлено в [18–20].

Проведенные исследования касались только развития пожаров в помещениях жилых и офисных зданий. Распространение ОФП на вышележащие этажи при пожаре автомобилей в открытой автостоянке, расположенной в зданиях, не рассматривалось. Таким образом, актуальной задачей является исследование возможности распространения пожара из открытой автостоянки в первом этаже жилых зданий и разработка обоснованных предложений по оптимизации противопожарных требований.

Цель настоящего исследования — на основе полевого моделирования изучить особенности распространения ОФП при горении автомобилей в открытой автостоянке, расположенной на первом этаже многоквартирного жилого дома, и оценить возможности пожаробезопасного размещения таких автостоянок в жилых зданиях.

Методика исследования

Полевое моделирование динамики развития и распространения пожара в открытой автостоянке по наружным конструкциям жилого здания проводилось при помощи компьютерной программы FDS в оболочке PyroSim [12]. FDS использует математическую модель на основе дифференциальных уравнений в частных производных, описывающих пространственно-временное распределение температуры и скоростей газовой среды, концентраций компонентов газовой среды (кислорода, продуктов горения и т.д.), давлений и плотностей [21].

Основные уравнения FDS решались на прямоугольной сетке. На всех твердых поверхностях задавались тепловые граничные условия и данные о горючести материала. Тепломассоперенос с поверхности и обратно рассчитывался с помощью эмпирических соотношений. При выполнении численного моделирования передача тепла и массы вычисляется напрямую. Для численной аппроксимации дифференциальных уравнений тепломассообмена применялся метод конечных разностей на регулярных сетках по вычислительной явной схеме «предиктор-корректор» второго порядка точности по координатам и времени.

На характер вертикального распространения пожара по фасаду здания влияют как конструктивные особенности и пожарная опасность строительных конструкций здания с внешней стороны (фасадов), так и параметры возникшего пожара [6]. В связи с этим важным является оценка характеристик горения автомобиля при выборе сценария развития пожара.

Анализ экспериментальных исследований [22–24] показал, что при горении различных типов легковых автомобилей общая мощность пожара составляла от 2 до 5 МВт. Перенос огня между горящим и рядом стоящими автомобилями наблюдается через промежутки времени от 5 до 20 мин. Следовательно, максимальная величина тепловыделения при выборе сценария пожара может приниматься как при горении одного автомобиля. Вместе с тем, для оценки возможных наихудших последствий пожара, как правило, используется критерий выбора наиболее неблагоприятных сценариев возникновения и развития пожара, характеризующихся максимальной опасностью для жизни людей и материальным ущербом. Исходя из этого, в данном исследовании в качестве предельного случая реализовывался сценарий одновременного возгорания двух автомобилей. Расчет динамики ОФП осуществлялся вплоть до времени выхода пожара на стационарный режим горения (полный охват пламенем двух автомобилей) с максимальным тепловыделением.

При подготовке исходных данных для моделирования применялись положения Приложения 6 «Методики определения расчетных величин пожарного риска в зданиях, сооружениях и строениях различных классов функциональной пожарной опасности»³. При проведении исследований рассматривались три основных вида развития пожара: круговое и линейное распространение пожара по твердой горючей нагрузке и неустановившееся горение горючей жидкости. В качестве параметров горючей нагрузки автомобиля при проведении численных расчетов исполь-

зовались данные [25] и пособия⁴: низшая рабочая теплота сгорания 31,7 МДж/кг; линейная скорость распространения пламени 0,0068 м/с; удельная скорость выгорания 0,0233 кг/(м²с); удельное дымовыделение 487 Нп м²/кг; удельное выделение диоксида углерода 1,295 кг/кг; удельное выделение оксида углерода 0,097 кг/кг; удельное потребление кислорода 2,64 кг/кг.

В качестве объекта защиты, на котором проводилось моделирование, рассмотрен фрагмент жилого дома со встроенной открытой автостоянкой на первом этаже. Строительные конструкции здания в этаже автостоянки, а также перекрытие и наружные стены фасада жилого здания выполнены из негорючих материалов с нормируемыми пределами огнестойкости. Высота этажей принята равной 3 м. Проемы этажа автостоянки принимались открытыми со всех сторон. Размеры оконного проема жилого помещения — 3 × 1,5 м, ширина противопожарного междуэтажного пояса при моделировании принималась от 1,2 до 3,5 м. Горючая нагрузка каждого автомобиля аппроксимировалась поверхностью параллелепипеда размерами 5 × 1,75 × 1,0 м. В соответствии с расчетным сценарием, после возгорания и развития пожара автомобилей пламя выходит за пределы наружной стены и воздействует на оконные проемы жилых помещений вышележащего этажа.

Выбор сценария развития пожара определялся наихудшими условиями: принималось, что в момент пожара оконные проемы вышележащего этажа открыты. В качестве критического условия опасности перехода пожара в жилое помещение принималось достижение у окна значения плотности потока $q_{кр} = 12,5 \text{ кВт/м}^2$ или значения температуры 230 °С (самовоспламенение бумажных изделий, штор и занавесок — материалы хлопок, целлюлоза, вискоза), либо блокирование жилого помещения одним из опасных факторов пожара, предусмотренных в «Методике определения расчетных величин пожарного риска в зданиях, сооружениях и строениях различных классов функциональной пожарной опасности».

Результаты и их обсуждение

В результате моделирования развития пожара в автостоянке были получены распределения полей опасных факторов пожара в различные моменты времени. Также рассмотрено влияние на распространение пожара размеров межэтажного пояса от 1,2 до 4 м, ширины противопожарного козырька от 0,25 до 1 м и ветровой нагрузки.

³ Методика определения расчетных величин пожарного риска в зданиях, сооружениях и строениях различных классов функциональной пожарной опасности. 2-е изд. М. : ВНИИПО, 2016. 79 с.

⁴ Абашкин А.А., Карпов А.В., Ушаков Д.В., Фомин М.В., Гилетич А.Н., Комков П.М., Самошин Д.А. Пособие по применению «Методики определения расчетных величин пожарного риска в зданиях, сооружениях и строениях различных классов функциональной пожарной опасности». М. : ВНИИПО, 2014. 226 с.

На рис. 1, 2 представлены характерные моменты результатов моделирования пожара в автостоянке при ширине межуэтажного пояса 1,2 м и отсутствии ветра. На рис. 3 представлен график падающего теплового потока на окно жилого помещения.

Результаты моделирования показали, что при принятых исходных данных возможность распространения пожара из открытой автостоянки на вышележащий жилой этаж достаточно высока. Превышение критических значений температуры у окна жилого помещения наблюдалось на 244 с, превышение критических значений плотности теплового потока — на 350 с, задымление с потерей видимости — на 90 с.

Дальнейшее моделирование показало, что при увеличении ширины межуэтажного пояса вплоть до 4 м возможность перехода пожара на вышележащий жилой этаж также сохраняется, хотя продолжительность времени от начала пожара до достижения критического значения температуры у окна жилого помещения возрастает. Так, при ширине межуэтажного пояса 3,5 м достижение критического значения наблюдалось на 333 с, а при ширине пояса 4 м — на 500 с.

Последующие исследования моделировали комбинации межуэтажного пояса нормативной ширины 1,2 м и противопожарного козырька из негорючих материалов над проемом автостоянки. Ширина козырька

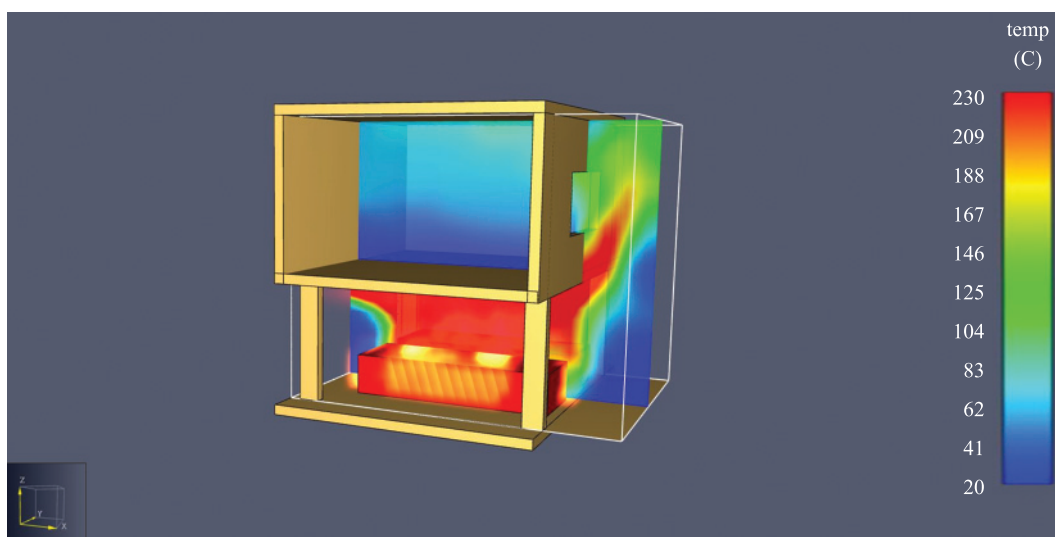


Рис. 1. Поля температур продуктов горения. Время с момента начала возгорания 244 с. Температура у окна достигает критического значения 230 °C

Fig. 1. Temperature fields of combustion products. The time period as of the ignition onset is 244 s. The temperature at the window reaches the critical value of 230 °C

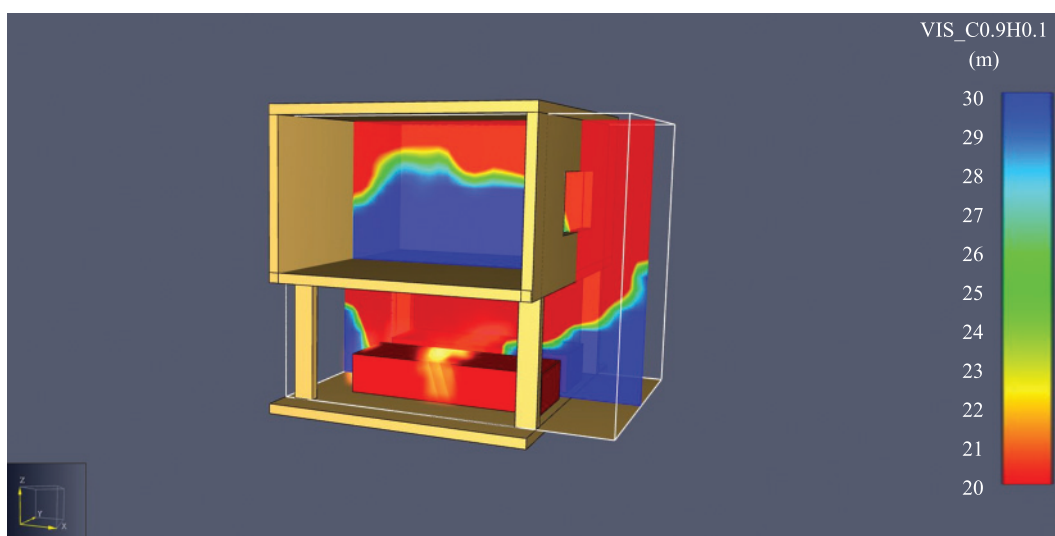


Рис. 2. Поля распространения дыма. Время с момента начала возгорания 90 с. Происходит задымление жилого помещения с потерей видимости

Fig. 2. Smoke spread fields. The time period as of the ignition onset is 90 s. The spread of smoke in the living space is accompanied by the loss of visibility

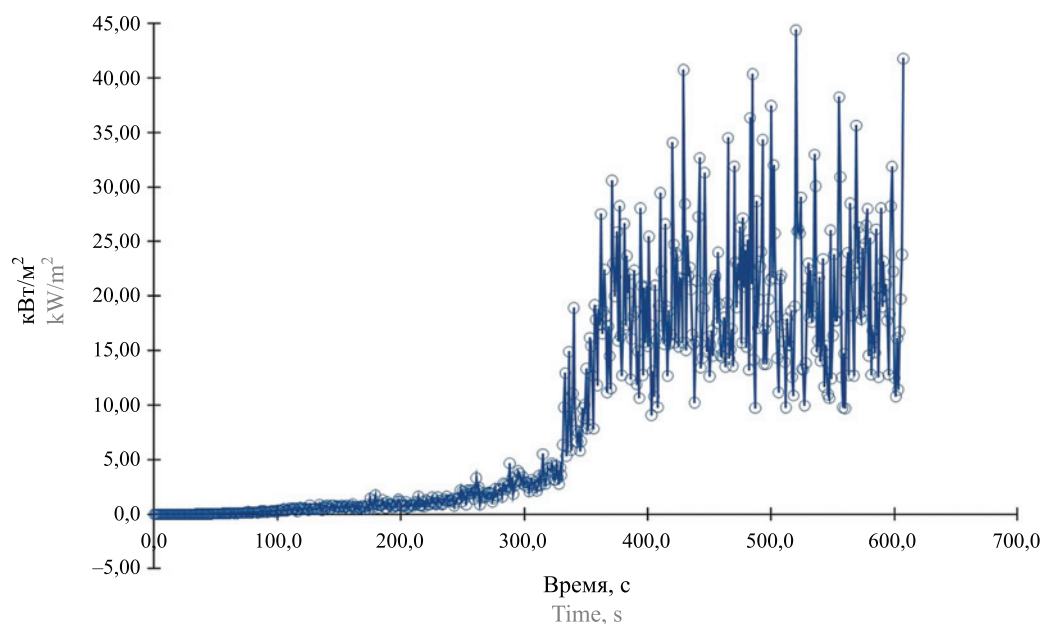


Рис. 3. График теплового потока у окна жилого помещения. Среднее значение теплового потока превышает принятое критическое значение

Fig. 3. Heat flow graph at the window of a dwelling. The average heat flow value exceeds the assumed critical one

варьировалась от 0,25 до 1 м. При моделировании также определялись наиболее неблагоприятные воздействия, создаваемые ветровым напором различных скоростей и направлений. Результаты показали, что при ширине козырьков менее 1 м условия нераспространения пожара не выполняются. Так, при ширине козырька 0,25 м и отсутствии ветра достижение критического значения температуры у окна жилого

помещения наблюдалось на 500 с. При ширине козырька 0,5 м и скорости ветра более 1 м/с в направлении от фасада задымление с потерей видимости наблюдалось на 167 с, а превышение температуры у окна — на 500 с.

Наиболее характерные моменты моделирования пожара в автостоянке при ширине козырька 1 м представлены на рис. 4–6.

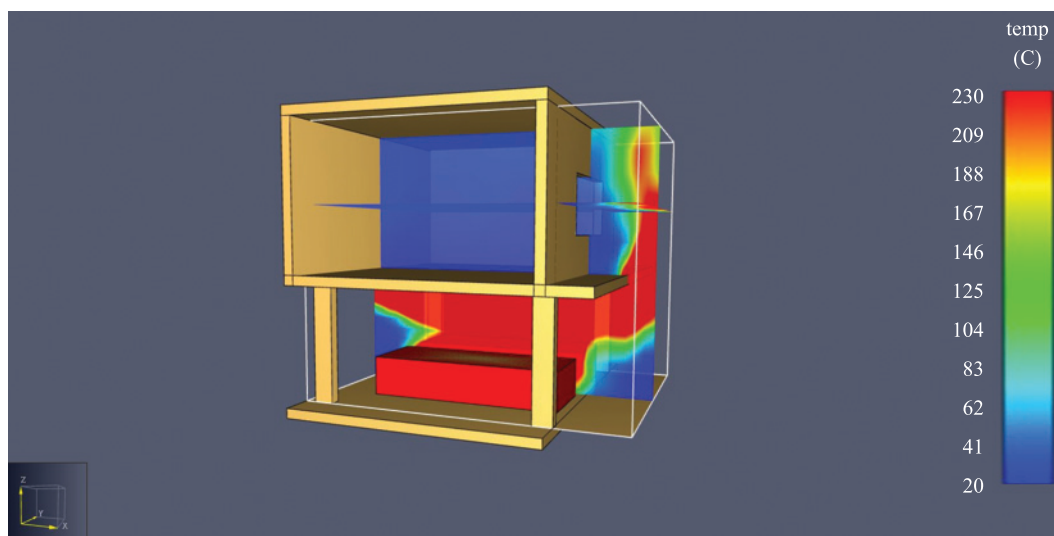


Рис. 4. Поля температур продуктов горения. Время с момента начала возгорания 500 с. Ветер 1 м/с в направлении от фасада. Температура у окна не превышает критического значения 230 °C

Fig. 4. Temperature fields of combustion products. The time period as of the ignition onset is 500 s. The wind velocity is 1 m/s, and it blows in the direction from the facade. The temperature at the window does not exceed the critical value of 230 °C

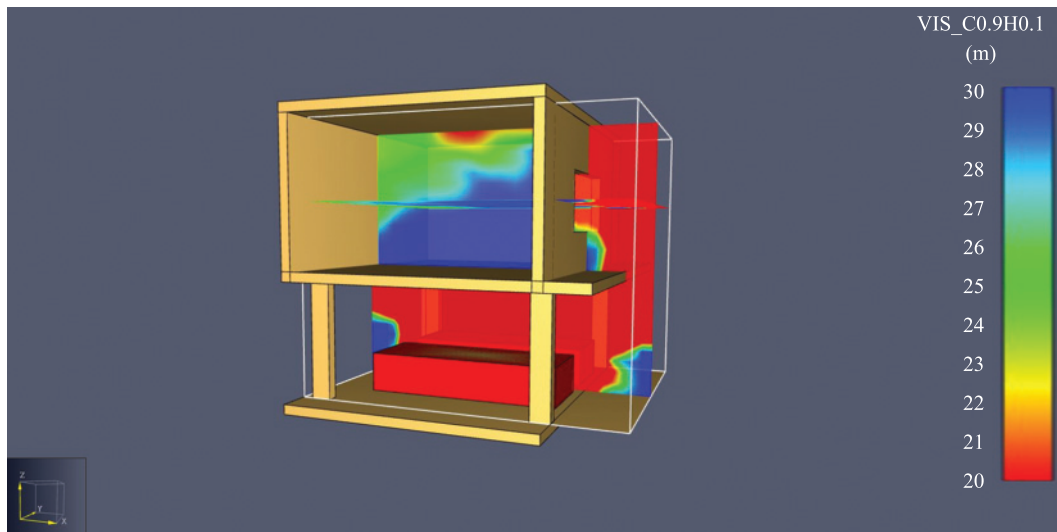


Рис. 5. Поля задымления. Время с момента начала возгорания 500 с. Ветер 1 м/с в направлении от фасада. В помещении наблюдается задымление, однако, без потери видимости

Fig. 5. Smoke spread fields. The time period as of the ignition onset is 500 s. The wind velocity is 1 m/s, and it blows in the direction from the facade. Smoke is observed in the room; however, it is not accompanied by the loss of visibility

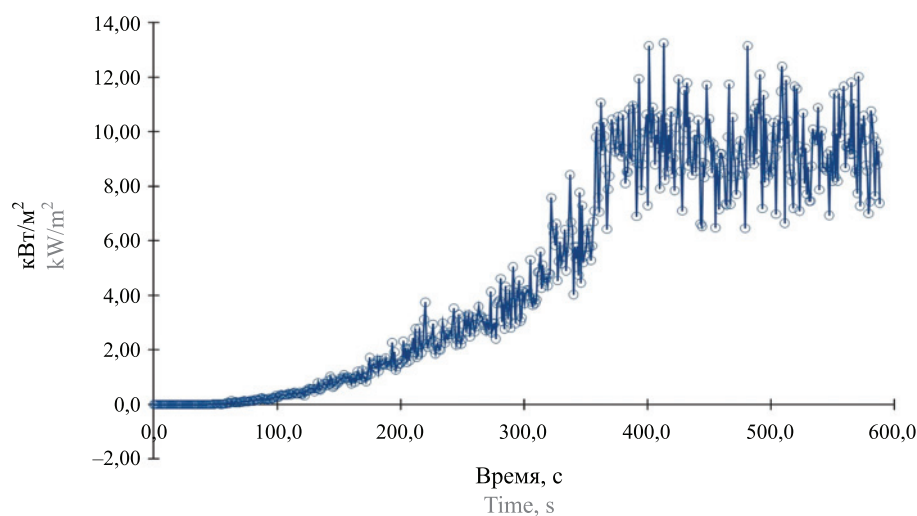


Рис. 6. График теплового потока у окна жилого помещения. Среднее значение теплового потока превышает принятое критическое значение

Fig. 6. Heat flow graph at the window of a dwelling. The average heat flow value exceeds the assumed critical one

Результаты моделирования показали, что при устройстве над проемом открытой автостоянки только противопожарного междуэтажного пояса (от 1,2 до 4 м) возможность распространения пожара на вышележащий жилой этаж достаточно высока. Это, помимо прочего, обусловлено проведением моделирования при открытых окнах жилого помещения, которые по действующим нормативам не могут выполняться не открываемыми, в отличие от помещений других классов функциональной пожарной опасности. Нераспространение пожара в жилые помещения наблюдалось только при устройстве над проемом автостоянки козырька (или иного выступа из наружной стены) из огнестойких материалов шириной не менее 1 м.

Как показали проведенные исследования, многоквартирные жилые здания с размещением открытых одноуровневых автостоянок легковых автомобилей в нижнем этаже следует предусматривать только в зданиях с высокой пожарной устойчивостью — I и II степеней огнестойкости класса конструктивной пожарной опасности C0 и C1. При этом необходимо обеспечить расстояние от проемов автостоянки до низа ближайших вышележащих оконных проемов не менее 4 м, либо предусмотреть над проемами помещений для хранения автомобилей глухие козырьки из материалов группы горючести НГ или Г1, выступающие от плоскости стены не менее чем на 1 м и перекрывающие ширину проема с каждой стороны не менее чем на 0,5 м. Вместо указанных ко-

зырьков также представляется обоснованным устройство выступающих из плоскости стены балконов или галерей из материалов НГ или Г1 с пределом огнестойкости не менее Е30 шириной не менее 1 м, также перекрывающих проем с каждой стороны не менее чем на 0,5 м, либо окна квартир над проемами автостоянки должны выходить в лоджии.

Участки наружных стен с внешней стороны с фасадными системами на расстоянии 4 м от краев проемов помещений для хранения автомобилей должны иметь класс пожарной опасности К0, с применением облицовки, отделки и теплоизоляции из материалов НГ или Г1.

Выводы

Проведенный анализ нормативной базы в области пожарной безопасности открытых автостоянок показал отсутствие требований по размещению открытых автостоянок в первых этажах жилых многоквартирных домов.

В связи с этим для оценки и обоснования возможности пожаробезопасного размещения таких автостоянок в жилых зданиях на основе полевого моделирования были изучены особенности распространения ОФП при горении автомобилей в открытой

автостоянке, расположенной на первом этаже многоквартирного жилого дома.

В результате моделирования развития пожара в автостоянке были получены распределения ОФП в районе окна жилого помещения в различные моменты времени. Моделирование проводилось при различных направлениях и скоростях ветра.

В качестве противопожарных барьеров, предотвращающих распространение пожара на вышележащий жилой этаж, были рассмотрены противопожарные пояса, а также огнестойкие козырьки над этажом автостоянки.

Показано, что устройство над проемом открытой автостоянки под жилым домом противопожарных междуэтажных поясов шириной до 4 м не обеспечивает предотвращения распространения пожара в вышележащее жилое помещение.

Нераспространение пожара в жилые помещения наблюдалось только при устройстве над проемом автостоянки козырька (или иного выступа из наружной стены) из огнестойких материалов шириной не менее 1 м.

По результатам исследований предложен комплекс противопожарных мероприятий, обеспечивающий возможность безопасного размещения открытых одноуровневых автостоянок в многоквартирных жилых зданиях.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Дуванова И.А., Симанкина Т.Л. Оптимизация организации парковочного пространства в условиях жилой застройки // Строительство уникальных зданий и сооружений. 2016. № 2 (41). С. 108–117. DOI: 10.18720/CUBS.41.8 URL: <https://elibrary.ru/item.asp?id=25675539>
2. Xiong Lu. Innovative design of parking guidance in intelligent parking lot // Innovation and Sustainability of Modern Railway. 2014. Vol. 2. Pp. 128–133.
3. Armstrong D., Reiner V., Rhoades B. Parking spaces // Advances in Mathematics. 2015. Vol. 269. Pp. 647–706. DOI: 10.1016/j.aim.2014.10.012
4. Carlsson J., Karlsson B. Numerical simulation of fire exposed facades — An initial investigation. Lund : Lunds university, 2001. 78 p.
5. Лицкевич В.В., Хасанов И.Р. Моделирование процесса разрушения остекления при пожаре // Актуальные проблемы пожарной безопасности : мат. Междунар. науч.-практ. конф. Ч. 1. М. : ВНИИПО, 2008. С. 141–143.
6. Хасанов И.Р. Тепловые воздействия на наружные конструкции при пожаре // Пожарная безопасность. 2013. № 4. С. 16–26. URL: <https://elibrary.ru/item.asp?id=20929298>
7. Delichatsios M.A., Ryan J., Tian N., Zhang J. Vertical safe separation distance between openings in multi-storey buildings having a fire resistant spandrel // MATEC Web of Conferences. 2016. Vol. 46. P. 04003. DOI: 10.1051/mateconf/20164604003
8. Kobrecki A. Model of fire spread out on outer building surface // Bulletin of the Polish Academy of Sciences Technical Sciences. 2015. Vol. 63. Issue 1. Pp. 135–144. DOI: 10.1515/bpasts-2015-0015
9. Cox G. Turbulent closure and the modelling of fire using computational fluid dynamics // Philosophical Transactions of the Royal Society A. 1998. Vol. 356. Issue 1748. Pp. 2835–2854. DOI: 10.1098/rsta.1998.0300
10. Olenick S.M., Carpenter D.J. An updated international survey of computer models for fire and smoke // Journal of Fire Protecting Engineering. 2003. Vol. 13. Issue 2. Pp. 87–110. DOI: 10.1177/1042391503013002001

11. 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
12. McGrattan K., McDermott R., Weinschenk C., Overholt K., Hostikka S., Floyd J. Fire Dynamics simulator user's guide: NIST Special Publication 1019. Sixth Edition. Gaithersburg : National Institute of Standards and Technology, 2013. 262 p.
13. Drean V., Schillinger R., Leborgne H., Auguin G., Guillaume E. Numerical simulation of fire exposed facades using LEPID II testing facility // Fire Technology. 2018. Vol. 54. Issue 4. Pp. 943–966. DOI: 10.1007/s10694-018-0718-y
14. Anderson J., Jansson R. Facade fire tests — measurements and modeling // MATEC Web of Conferences. 2013. Vol. 9. P. 02003. DOI: 10.1051/mateconf/20130902003
15. Yakovchuk R., Kuzyk A., Skorobagatko T., Yemelyanenko S., Borys O., Dobrostan O. Computer simulation of fire test parameters façade heat insulating system for fire spread in fire dynamics simulator (FDS) // News of the National Academy of Sciences of the Republic of Kazakhstan. Series of geology and technology sciences. 2020. Vol. 4. Issue 442. Pp. 35–44. DOI: 10.32014/2020.2518-170X.82
16. Anderson J., Boström L., Jansson R., Milovanovic B. Fire dynamics in facade fire tests: Measurement, modeling and repeatability // Applications of Structural Fire Engineering. Conference: ASFE 2015. Dubrovnik, Croatia, 2015. DOI: 10.14311/asfe.2015.059
17. Khasanov I.R., Karpov A.V. Modeling fire spread along the non-combustible building facades of different geometry // Proceeding of the Ninth International Seminar on Fire and Explosion Hazards (ISFEH9). St. Petersburg Polytechnic University Press. 2019. Pp. 534–541. DOI: 10.18720/spbpu/2/k19-1
18. Mammoser J.H., Battaglia F. A computational study on the use balconies to reduce flame spread in high-rise apartment fires // Fire Safety Journal. 2004. Vol. 39. Pp. 277–296.
19. Xue-fei Xing, Jing-yan Zhang, Yan-feng Li. A computational study on structural barrier to vertical spread of window spill plume along building exterior facade // Procedia Engineering. 2013. Vol. 52. Pp. 475–482. DOI: 10.1016/j.proeng.2013.02.171
20. Nan Zhao, Jing-yan Zhang, Xue-fei Xing. A computational study on effect of balcony on vertical spread of window spill plume along building exterior facade // Procedia Engineering. 2014. Vol. 71. Pp. 523–528. DOI: 10.1016/j.proeng.2014.04.075
21. McGrattan K., McDermott R., Weinschenk C., Overholt K., Hostikka S., Floyd J. Fire Dynamics Simulator. Technical reference guide. Vol. 1: Mathematical Model. NIST Special Publication 1018. Sixth Edition. Gaithersburg: National Institute of Standards and Technology, 2013. 149 p. DOI: 10.6028/nist.sp.1018
22. Shintani Y., Kakae N., Harada K., Masuda H., Takahashi W. Experimental investigation of burning behavior of automobiles // 6th Asia-Oceania Symposium on Fire Science and Technology, Daegu: Korea. 2004. Pp. 43–51.
23. Shipp M., Spearpoint M. Measurements of the severity of fires involving private motor vehicles // Fire and Materials. 1995. Vol. 19. Issue 3. Pp. 143–151. DOI: 10.1002/fam.810190307
24. Song Bo, Zhao Li-zeng, Bai Dian-tao. Experimental study on combustion characteristic of ordinary car // China Safety Science Journal. 2013. Vol. 23 (7). Pp. 26–31.
25. Кошмаров Ю.А. Прогнозирование опасных факторов пожара в помещении : учеб. пос. М. : Академия ГПС МВД России, 2000. 118 с.

REFERENCES

1. Duvanova I.A., Simankina T.L. Optimization of parking space in the conditions residential area. *Construction of Unique Buildings and Structures*. 2016; 41:108-117. DOI: 10.18720/CUBS.41.8 URL: <https://elibrary.ru/item.asp?id=25675539> (rus).
2. Xiong Lu. Innovative design of parking guidance in intelligent parking lot. *Innovation and Sustainability of Modern Railway*. 2014; 2:128-133.
3. Armstrong D., Reiner V., Rhoades B. Parking spaces. *Advances in Mathematics*. 2015; 269:647-706. DOI: 10.1016/j.aim.2014.10.012
4. Carlsson J., Karlsson B. *Numerical Simulation of Fire Exposed Facades — An initial investigation*. Lund, Lunds university, 2001; 78.
5. Litskevich V.V., Khasanov I.R. Modeling of the process of destruction of glazing in case of fire. *Actual Problems of Fire Safety : materials of the International Scientific and Practical Conference. Part 1*. Moscow, VNIPO, 2008; 141-143. (rus).
6. Khasanov I.R. Heat effects on external designs at a fire. *Pozharnaya bezopasnost/Fire Safety*. 2013; 4:16-26. URL: <https://elibrary.ru/item.asp?id=20929298> (rus).

7. Delichatsios M.A., Ryan J., Tian N., Zhang J. Vertical safe separation distance between openings in multi-storey buildings having a fire resistant spandrel. *MATEC Web of Conferences*. 2016; 46:04003. DOI: 10.1051/mateconf/20164604003
8. Kobrecki A. Model of fire spread out on outer building surface. *Bulletin of the Polish Academy of Sciences Technical Sciences*. 2015; 63(1):135-144. DOI: 10.1515/bpasts-2015-0015
9. Cox G. Turbulent closure and the modeling of fire using computational fluid dynamics. *Philosophical Transactions of the Royal Society A*. 1998; 356(1748): 2835-2854. DOI: 10.1098/rsta.1998.0300.
10. Olenick S.M., Carpenter D.J. An updated international survey of computer models for fire and smoke. *Journal of Fire Protecting Engineering*. 2003; 13(2):87-110. DOI: 10.1177/1042391503013002001
11. 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
12. McGrattan K., McDermott R., Weinschenk C., Overholt K., Hostikka S., Floyd J. *Fire Dynamics Simulator User's Guide: NIST Special Publication 1019. Sixth Edition*. Gaithersburg, National Institute of Standards and Technology, 2013; 262.
13. Drean V., Schillinger R., Leborgne H., Auguin G., Guillaume E. Numerical simulation of fire exposed facades using LEPID II testing facility. *Fire Technology*. 2018; 54(4):943-966. DOI: 10.1007/s10694-018-0718-y
14. Anderson J., Jansson R. Facade fire tests — measurements and modeling. *MATEC Web of Conferences*. 2013; 9:02003. DOI: 10.1051/mateconf/20130902003
15. Yakovchuk R., Kuzyk A., Skorobagatko T., Emelyanenko S., Borys O., Dobrostan O. Computer simulation of fire test parameters façade heat insulating system for fire spread in fire dynamics simulator (FDS). *News of the National Academy of Sciences of the Republic of Kazakhstan. Series of geology and technology sciences*. 2020; 4(442):35-44. DOI: 10.32014/2020.2518-170X.82
16. Anderson J., Boström L., Jansson R., Milovanovic B. Fire dynamics in facade fire tests: Measurement, modeling and repeatability. *Applications of Structural Fire Engineering. Conference: ASFE 2015*. Dubrovnik, Croatia, 2015. DOI: 10.14311/asfe.2015.059
17. Khasanov I.R., Karpov A.V. Modeling fire spread along the non-combustible building facades of different geometry. *Proceeding of the Ninth International Seminar on Fire and Explosion Hazards (ISFEH9)*. St. Petersburg Polytechnic University Press, 2019; 534-541. DOI: 10.18720/spbpu/2/k19-1
18. Mammoser J.H., Battaglia F. A computational study on the use balconies to reduce flame spread in high-rise apartment fires. *Fire Safety Journal*. 2004; 39:277-296.
19. Xue-fei Xing, Jing-yan Zhang, Yan-feng Li. A computational study on structural barrier to vertical spread of window spill plume along building exterior facade. *Procedia Engineering*. 2013; 52:475-482. DOI: 10.1016/j.proeng.2013.02.171
20. Nan Zhao, Jing-yan Zhang, Xue-fei Xing. A computational study on effect of balcony on vertical spread of window spill plume along building exterior facade. *Procedia Engineering*. 2014; 71:523-528. DOI: 10.1016/j.proeng.2014.04.075
21. McGrattan K., McDermott R., Weinschenk C., Overholt K., Hostikka S., Floyd J. *Fire Dynamics Simulator. Technical reference guide. Volume 1: Mathematical Model. NIST Special Publication 1018. Sixth Edition*. Gaithersburg, National Institute of Standards and Technology, 2013; 149. DOI: 10.6028/nist.sp.1018
22. Shintani Y., Kakae N., Harada K., Masuda H., Takahashi W. Experimental investigation of burning behavior of automobiles. *6th Asia-Oceania Symposium on Fire Science and Technology*. Daegu, Korea, 2004; 43-51.
23. Shipp M., Spearpoint M. Measurements of the severity of fires involving private motor vehicles. *Fire and Materials*. 1995; 19(3):143-151. DOI: 10.1002/fam.810190307
24. Song Bo, Zhao Li-zeng, Bai Dian-tao. Experimental study on combustion characteristic of ordinary car. *China Safety Science Journal*. 2013; 23(7):26-31.
25. Koshmarov Yu.A. *Forecasting of fire hazards in the room : A textbook*. Moscow, Academy of GPS of the Ministry of Internal Affairs of Russia, 2000; 118. (rus).

Поступила 30.11.2021, после доработки 28.12.2021; принята к публикации 13.01.2022
Received November 30, 2021; Received in revised form December 28, 2021; Accepted January 13, 2022

Информация об авторах

ХАСАНОВ Ирек Равильевич, д-р техн. наук, главный научный сотрудник, Всероссийский ордена «Знак Почета» научно-исследовательский институт противопожарной обороны Министерства Российской Федерации по делам гражданской обороны, чрезвычайным ситуациям и ликвидации последствий стихийных бедствий, Россия, 143903, Московская обл., г. Балашиха, мкр. ВНИИПО, 12; РИНЦ ID: 157014; Researcher ID: T-4177-2017; ORCID: 0000-0002-5659-0746; e-mail: irhas@rambler.ru

ЗУЕВ Станислав Анатольевич, канд. техн. наук, ведущий научный сотрудник, Всероссийский ордена «Знак Почета» научно-исследовательский институт противопожарной обороны Министерства Российской Федерации по делам гражданской обороны, чрезвычайным ситуациям и ликвидации последствий стихийных бедствий, Россия, 143903, Московская обл., г. Балашиха, мкр. ВНИИПО, 12; РИНЦ ID: 328576; ORCID: 0000-0003-4498-3021; e-mail: k708@yandex.ru

АБАШКИН Александр Анатольевич, начальник отдела, Всероссийский ордена «Знак Почета» научно-исследовательский институт противопожарной обороны Министерства Российской Федерации по делам гражданской обороны, чрезвычайным ситуациям и ликвидации последствий стихийных бедствий, Россия, 143903, Московская обл., г. Балашиха, мкр. ВНИИПО, 12; РИНЦ ID: 157014; ORCID: 0000-0002-6347-3257; e-mail: k708@yandex.ru

ЗУЕВА Анна Станиславовна, научный сотрудник, Всероссийский ордена «Знак Почета» научно-исследовательский институт противопожарной обороны Министерства Российской Федерации по делам гражданской обороны, чрезвычайным ситуациям и ликвидации последствий стихийных бедствий, Россия, 143903, Московская обл., г. Балашиха, мкр. ВНИИПО, 12; РИНЦ ID: 157014; ORCID: 0000-0002-9551-0569; e-mail: k708@yandex.ru

Вклад авторов:

Хасанов И.Р. — научное руководство, концепция исследования, развитие методологии, написание исходного текста, итоговые выводы.

Зуев С.А. — выбор направлений моделирования, постановка исходной задачи, написание исходного текста, итоговые выводы.

Абашкин А.А. — участие в выборе методов моделирования, доработка текста, итоговые выводы.

Зуева А.С. — осуществление моделирования, подготовка графических материалов.

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Information about the authors

Irek R. KHASANOV, Dr. Sci. (Eng.), Chief Researcher, All-Russian Research Institute for Fire Protection of Ministry of Russian Federation for Civil Defense, Emergencies and Elimination of Consequences of Natural Disasters, VNIPO, 12, Balashikha, Moscow Region, 143903, Russian Federation; ID RISC: 157014; Researcher ID: T-4177-2017; ORCID: 0000-0002-5659-0746; e-mail: irhas@rambler.ru

Stanislav A. ZUEV, Cand. Sci. (Eng.), Leading Researcher, All-Russian Research Institute for Fire Protection of Ministry of Russian Federation for Civil Defense, Emergencies and Elimination of Consequences of Natural Disasters, VNIPO, 12, Balashikha, Moscow Region, 143903, Russian Federation; ID RISC: ORCID: 0000-0003-4498-3021; e-mail: k708@yandex.ru

Aleksandr A. ABASHKIN, Head of Department, All-Russian Research Institute for Fire Protection of Ministry of Russian Federation for Civil Defense, Emergencies and Elimination of Consequences of Natural Disasters, VNIPO, 12, Balashikha, Moscow Region, 143903, Russian Federation; ID RISC: 157014; ORCID: 0000-0002-6347-3257; e-mail: k708@yandex.ru

Anna S. ZUEVA, Researcher, All-Russian Research Institute for Fire Protection of Ministry of Russian Federation for Civil Defense, Emergencies and Elimination of Consequences of Natural Disasters, VNIPO, 12, Balashikha, Moscow Region, 143903, Russian Federation; ID RISC: 157014; ORCID: 0000-0002-9551-0569; e-mail: k708@yandex.ru

Contribution of the authors:

Irek R. Khasanov — scientific guidance, research concept, development of methodology, writing the draft, final conclusions.

Stanislav A. Zuev — choice of modeling directions, formulation of the initial problem, writing the draft, final conclusions.

Aleksandr A. Abashkin — participation in the selection of modeling methods, revision of the text, final conclusions.

Anna S. Zueva — modeling, preparation of graphic materials.

The authors declare no conflicts of interests.

ПОЖАРОВЗРЫВБЕЗОПАСНОСТЬ/FIRE AND EXPLOSION SAFETY. 2022. Т. 31. № 1. С. 88–98
POZHAROVZRYVOBEZOPASNOST/FIRE AND EXPLOSION SAFETY. 2022; 31(1):88-98

НАУЧНАЯ СТАТЬЯ/RESEARCH PAPER

УДК 624.042

<https://doi.org/10.22227/0869-7493.2022.31.01.88-98>

Определение нагрузок на здания и сооружения при внешних взрывах топливно-воздушных смесей

Максим Александрович Липленко✉, Александр Николаевич Бороденко,
Георгий Владимирович Мосолов

Научно-исследовательский институт трубопроводного транспорта, Москва, Россия

АННОТАЦИЯ

Введение. При проектировании зданий и сооружений на опасных производственных объектах перед инженером стоит важная задача — определить нагрузки при внешних взрывах топливно-воздушных смесей. В настоящее время в практике проектирования для оценки различных воздействий на строительные конструкции широко применяются программные комплексы, использующие подход вычислительной гидрогазодинамики (CFD). В связи с этим необходимо разработать подход к расчету нагрузок методами численного моделирования и выполнить его оценку, сравнив с экспериментальными данными.

Цели и задачи. Целью настоящей работы является разработка подхода к определению нагрузок от внешнего детонационного взрыва топливно-воздушной смеси на здания и сооружения различной конфигурации при помощи методов вычислительной гидрогазодинамики.

Основная часть. Рассмотрен подход к определению нагрузок на строительные конструкции зданий и сооружений при внешних детонационных взрывах ТВС на основании метода «сжатого баллона». Предложены зависимости для задания исходных данных при выполнении численных расчетов с помощью компьютерных программ, использующих подход вычислительной гидрогазодинамики — CFD. Выполнено численное моделирование в программном комплексе ANSYS Fluent различных экспериментов. Для оценки точности метода «сжатого баллона» применительно к расчету внешнего детонационного взрыва проведено сравнение результатов численного моделирования и инженерных нормативных методик с различными экспериментами.

Выводы. Проведенное численное моделирование распространения взрывной волны при различных условиях показало качественное и количественное совпадение с рассматриваемыми экспериментами. Рассмотренный расчетный метод позволяет достаточно точно реализовать профиль давления на любую поверхность здания или сооружения при внешнем детонационном взрыве ТВС и оценить несущую способность строительных конструкций. Предложенный подход к расчету нагрузок при внешнем детонационном взрыве ТВС может применяться при проектировании зданий или сооружений различной конфигурации.

Ключевые слова: численное моделирование; взрывная нагрузка; взрывная волна; взрыв облака; взрыв газа; вычислительная гидрогазодинамика

Для цитирования: Липленко М.А., Бороденко А.Н., Мосолов Г.В. Определение нагрузок на здания и сооружения при внешних взрывах топливно-воздушных смесей // Пожаровзрывобезопасность/Fire and Explosion Safety. 2022. Т. 31. № 1. С. 88–98. DOI: 10.22227/0869-7493.2022.31.01.88-98

✉ Липленко Максим Александрович, e-mail: Liplenko@gmail.com

The calculation of loads on buildings and structures caused by outdoor explosions of the fuel-air mixture

Maxim A. Liplenko✉, Alexandr N. Borodenko, Georgiy V. Mosolov

Pipeline Transport Institute, Moscow, Russian Federation

ABSTRACT

Introduction. An important engineering task, to be solved in the process of designing buildings and structures for hazardous industrial facilities, is to determine values of loads caused by outdoor explosions of the fuel-air mixture. Nowadays software packages, that use the computational fluid dynamics (CFD) approach, are widely applied in the design practice to assess various effects on building structures. In this regard, it is necessary to develop a load calculation method, that employs numerical simulation, and verify it in comparison with the experimental data.

Goals and objectives. The purpose of this work is to use the method of computational fluid dynamics to analyze external sympathetic detonation loads on various types of buildings and structures.

The body of the article. The article addresses the “compressed balloon” method used to analyze loads, caused by outdoor explosions of gas. Dependencies, proposed in the article, are needed to set the input data and make numerical calculations using the computational fluid dynamics (CFD) technique. The numerical modeling of various experiments in the ANSYS Fluent software package was conducted. The authors compared the results of numerical modeling and standard engineering methods with various experiments to assess the accuracy of the “compressed balloon” method used to analyze an outdoor detonation explosion.

Conclusions. The authors have proven the qualitative and quantitative convergence of the numerical model of blast wave propagation and the experimental data. This calculation method allows to accurately apply the pressure profile to any surface of a building or structure in the course of an outdoor detonation explosion and estimate the bearing capacity of building structures. The proposed method can be used in the design of buildings or structures that feature various configurations.

Keywords: numerical simulation; blast loading; blast wave; cloud explosion; gas explosion; computational fluid dynamics (CFD)

For citation: Liplenko M.A., Borodenko A.N., Mosolov G.V. The calculation of loads on buildings and structures caused by outdoor explosions of the fuel-air mixture. *Pozharovzryvbezopasnost/Fire and Explosion Safety*. 2022; 31(1):88-98. DOI: 10.22227/0869-7493.2022.31.01.88-98 (rus).

✉ Maxim Alexandrovich Liplenko, e-mail: Liplenko@gmail.com

Введение

Проектирование строительных конструкций зданий и сооружений топливно-энергетического сектора связано с необходимостью учета нагрузок от взрывов топливно-воздушных смесей (ТВС). Как известно, взрывы ТВС разделяют на два режима взрывного превращения: детонацию и дефлаграцию [1, 2]. В настоящей работе рассматривается определение нагрузок при детонационном взрыве ТВС.

Взаимодействие взрывной волны с преградой (зданием или сооружением) зависит от типа взрывного превращения: детонация или дефлаграция [1]. В отечественных нормативных документах, применяемых при проектировании: РБ Г-05-039-96¹, РБ НТЦ ПБ², СП 296.1325800.2017³, отсутствует полная методика расчета динамических нагрузок на различные поверхности здания или сооружения (боковые стены, кровля, тыльная стена и т.д.). Только в методике СП 296.1325800.2017 предложены соотношения для расчета параметров нагрузок при детонационном и дефлаграционном взрывах на поверхности отдельно стоящего здания прямоугольной конфигурации при воздействии ударной волны (УВ). Методика СП 296.1325800.2017 основана на консервативном подходе к определению нагрузок на здания. В ней рассматриваются взрывы конденсированных ВВ. Более

детально она представлена в нормах США⁴. В случае зданий сложных конфигураций или влияния окружающей застройки выполнить расчеты на нагрузки от взрывов ТВС не представляется возможным.

Таким образом, перед проектировщиком стоит вполне актуальная задача получения обоснованных схем нагрузок от внешнего взрыва на строительные конструкции зданий различной конфигурации, а также разработка алгоритма определения нагрузок от внешнего взрыва на строительные конструкции при проектировании.

Программные комплексы численного моделирования

Для более точной оценки, по сравнению с нормативными методами расчета последствий аварийных взрывов, используют подход вычислительной гидрогазодинамики (CFD — Computational Fluid Dynamics). С помощью данного метода возможно выполнить расчет нагрузок от взрыва на здания и сооружения различной конфигурации, а также отдельные элементы конструкций [3–6]. Программное обеспечение, основанное на подходе CFD, учитывает эффекты, связанные с взаимодействием взрывной волны с преградами, геометрию застройки, расстояние между источником взрыва и конструкцией и т.д.

Численные методы исследования гидрогазодинамики включают совокупность физических, химических и математических процессов. На сегодняшний день существует достаточно большое количество компьютерных кодов в области вычислительной гидрогазодинамики [4–16], среди которых можно выделить две группы:

¹ РБ Г-05-039-96. Руководство по безопасности. Руководство по анализу опасности аварийных взрывов и определению параметров их механического действия. М. : НТЦ АРБ Госатомнадзора России. 2000.

² Руководство по безопасности «Методика оценки последствий аварийных взрывов топливно-воздушных смесей». М. : ЗАО «НТЦ исследований проблем промышленной безопасности». 2015. 44 с.

³ СП 296.1325800.2017. Здания и сооружения. Особые воздействия. М. : Стандартинформ. 2017. 65 с.

⁴ UFC 3-340-02. Structures to Resist the Effects of Accidental Explosions, Department of Defense, Washington, DC. 2008.

- *Первая группа.* Программные продукты общего назначения, применяемые практически во всех отраслях: космонавтике, авиации, строительстве и архитектуре, судостроении, медицине и т.д. К ним относятся такие коммерческие программные продукты: ANSYS CFD (Fluent и CFX), STAR-CD, FLOWVISION, ЛОГОС, LS-DYNA и т.д., а также некоммерческий продукт с открытым исходным кодом: OpenFOAM.
- *Вторая группа.* Программные продукты специализированного назначения, применяемые в сфере промышленной безопасности [4, 10, 11]. К ним относятся такие коммерческие коды, как: Autoreagas, Flacs GexCon, PHAST, ExploCFD7, COM3D Code и т.д., а также некоммерческий продукт с открытым исходным кодом: BlastFoam от Synthetik Technologies.

Первая группа программных комплексов (ПК) прежде всего характеризуется большими возможностями, поскольку этого требует спектр решаемых задач гидрогазодинамики различных отраслей. Основными плюсами ПК первой группы являются: различные математические модели горения и турбулентности, позволяющие решать широкий круг задач, высокая точность реализованных алгоритмов.

Применение ПК первой группы в решении практических задач промышленной безопасности, связанных со взрывами ТВС, прежде всего сдерживается главным образом из-за высоких требований к вычислительным ресурсам (многопроцессорные станции с большими объемами оперативной и дисковой памяти).

Для решения вопроса, связанного с высокими требованиями к вычислительным ресурсам, применяют специализированные ПК вычислительной гидрогазодинамики (вторая группа). В них используются наиболее простые с вычислительной точки зрения модели турбулентности и горения. На сегодняшний день разработаны алгоритмы, позволяющие упростить геометрию объектов в расчетной модели для экономии вычислительных ресурсов. Применение специализированных ПК при решении задач со взрывами ТВС позволяет сэкономить время расчета от нескольких суток до нескольких часов.

Метод «сжатого баллона»

В практике расчета нагрузок от взрыва на здания и сооружения нашел широкое применение сравнительно простой метод «сжатого баллона», не требующий больших вычислительных ресурсов. Следует отметить, что применяется он во многих ПК, причем как из первой группы, так и из второй. Метод «сжатого баллона» хорошо подходит для моделирования воздействия взрывной волны на здания и сооружения

при детонационном взрыве, т.е. моделирует воздушную ударную волну (ВУВ).

Метод «сжатого баллона» — феноменологическая модель. Функция «давление-время», полученная в результате сжатия баллона, может приблизительно соответствовать кривой давления ВУВ. Величину сжатия можно откалибровать по максимальному давлению или импульсу.

Идея метода «баллона» заключается в использовании области (баллона) со сжатым воздухом начального размера, давление и температура в этой области значительно превышают начальные, которые назначены на окружающее пространство.

Применительно к моделированию внешнего взрыва ТВС в расчете принимается, что облако имеет форму полусферы. Для расчета основных исходных данных: давления и температуры в области баллона, воспользуемся следующим алгоритмом:

1. Рассчитываем начальный объем облака ТВС по следующей формуле:

$$V_{bal} = \frac{V_m \chi M_T T}{\mu C_{stx} T_0}, \quad (1)$$

где V_m — молярный объем газа;

χ — доля массы исходного топлива, переходящего в облако ТВС;

M_T — масса исходного топлива;

T — температура окружающей среды;

μ — молекулярная масса горючего;

C_{stx} — концентрация горючего в стехиометрической смеси;

$T_0 = 273,15$ К — температура.

2. Так как форма облака принята в виде полусферы, то ее радиус определяем по формуле:

$$R_0 = \sqrt[3]{\frac{3V_{TBC}}{2\pi}}. \quad (2)$$

3. Эффективный энергозапас горючей смеси при наземном взрыве определяем по формуле:

$$E_{ef} = 2\beta E_{spec} \chi M_T, \quad (3)$$

где β — корректировочный параметр для расчета энерговыделения в зависимости от вида горючего [1];

E_{spec} — теплота сгорания горючего газа, принимается $E_{spec} = 44$ МДж/кг [1].

4. Начальное избыточное давление в «баллоне» определяем по формуле Броуда [17]:

$$P_{bal} = \frac{E_{ef} (\gamma - 1)}{V_{bal}} + P_0, \quad (4)$$

где P_0 — атмосферное давление;

γ — показатель адиабаты.

5. Выполняем расчет коэффициента f_{bal} для того, чтобы распределить масштабный баланс на внутреннюю энергию и плотность газа в баллоне:

$$f_{bal} = \sqrt{\frac{P_{bal}}{P_0}}. \quad (5)$$

6. Выполняем расчет внутренней удельной энергии $e_{int,bal}$ и плотности газа баллона ρ_{bal} :

$$\rho_{bal} = \rho_0 f_{bal}, \quad (6)$$

$$e_{int} = e_{int,0} f_{bal}. \quad (7)$$

7. Начальную температуру в «баллоне» определяем из уравнения состояния идеального газа:

$$T_{bal} = \frac{P_{bal} M_{air}}{R_G \rho_{bal}}, \quad (8)$$

где M_{air} — молярная масса (воздуха);

R_G — газовая постоянная, принимается $R_G = 8,314$ Дж/(моль·К).

Начальное давление в баллоне обычно получается из уравнения состояния идеального газа и представляет собой комбинацию более высокой внутренней энергии (температуры) и более высокой плотности газа баллона по сравнению с атмосферными значениями. Следовательно, при заданном давлении в воздушном баллоне только одна из этих двух величин независима, а другая является результатом уравнения состояния.

Описанная методика определения начального состояния «сжатого баллона» может использоваться в различных CFD программных продуктах. При необходимости исходные параметры «сжатого баллона» (давление P_{bal} и температура T_{bal}) могут быть откалиброваны, например, в соответствии с методикой,

разработанной М. Larcher и F. Casadei, описанной в [18].

Верификация

Для подтверждения предлагаемой методики были проведены расчеты по экспериментальным данным. Расчеты выполнялись в два этапа. На первом этапе выполнялось моделирование экспериментов, выполненных разными независимыми авторскими коллективами [19, 20]. На втором этапе выполнялось моделирование эксперимента, проведенного ООО «НИИ Транснефть» совместно с НИУ МГСУ.

Для сравнения выбирались эксперименты с наиболее полным описанием методик испытаний и исходных данных. Среди таких исследований можно выделить два эксперимента: М. Groethe [19] и Т. Nozu [20].

Эксперимент М. Groethe проведен авторским коллективом: М. Groethe, Е. Merilo, J. Colton, S. Chiba, Y. Sato, Н. Iwabuchi [19]. Для формирования облака ТВС использовалась полусфера объемом 300 м^3 . Полусфера состояла из каркаса (в виде геодезического купола) и тента — полиэтиленовой пленки. В эксперименте использовалась водородно-воздушная смесь стехиометрического состава. Инициирование облака производилось из центра на земле. Для инициирования детонации облака применялось ВВ С-4. Контрольная точка, для которой опубликован график изменения давления во времени, располагалась на уровне земли на расстоянии от центра $R = 15,61 \text{ м}$.

Эксперимент Т. Nozu проведен в Японии авторским коллективом: Т. Nozu, R. Tanaka, Т. Ogawa, К. Hibi, Y. Sakai [20]. Целью эксперимента было получение экспериментальных данных о параметрах взрыва ТВС и эффективности защитной стены, сни-

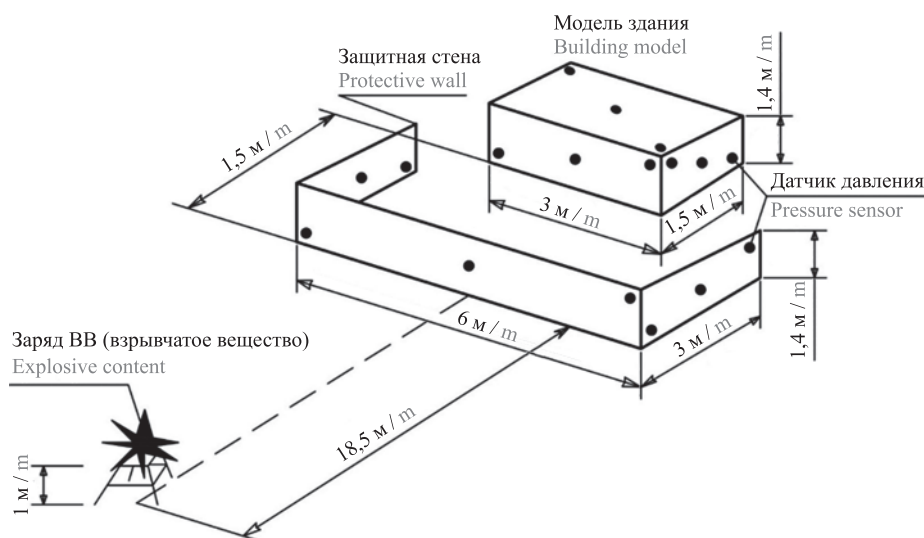


Рис. 1. Схема проведения эксперимента
Fig. 1. Design of an experiment

жающей взрывные нагрузки. Для формирования облака ТВС использовался куб объемом $5,27 \text{ м}^3$ (размеры куба $\approx 2,24 \times 2,24 \times 1,05(h) \text{ м}$), который состоял из каркаса и тента — полиэтиленовой пленки. Защитная стена выполнялась из железобетона высотой 2 м, шириной 10 м и толщиной 0,15 м. Стена располагалась на расстоянии 4 м от передней грани куба ТВС. Для детонации инициирование проводилось с помощью ВВ С-4 массой 10 гр из центра куба на земле. При испытаниях измеряли давление на поверхности защитной стены и на земле, а также перемещения стены. В эксперименте использовалась водородно-воздушная смесь стехиометрического состава.

Испытания ООО «НИИ Транснефть» (далее эксперимент НИИ) проводились на специализированном

полигоне. Целью испытаний являлось определение нагрузок от детонационного взрыва на различные поверхности здания, закрытого от УВ защитной стеной. Схема проведения испытания показана на рис. 1. В эксперименте применялся безоболочечный заряд взрывчатого вещества (ВВ) в виде 50 патронов аммонита — 6ЖВ массой 0,2 кг каждый. Тротиловый эквивалент заряда составил 10 кг. Патроны были соединены вместе таким образом, чтобы заряд имел близкую к цилиндрической форму. Заряд располагался на высоте 1,0 м над поверхностью грунта. Обстреливаемая модель представляла собой модель здания прямоугольной формы ($1,5 \times 3,0 \times 1,4(h) \text{ м}$), которая располагалась за защитной стеной ($3,0 \times 6,0 \times 1,4(h) \text{ м}$) на расстоянии 1,5 м. Расстояние от заряда до передней грани защитной стены составляло 18,5 м.

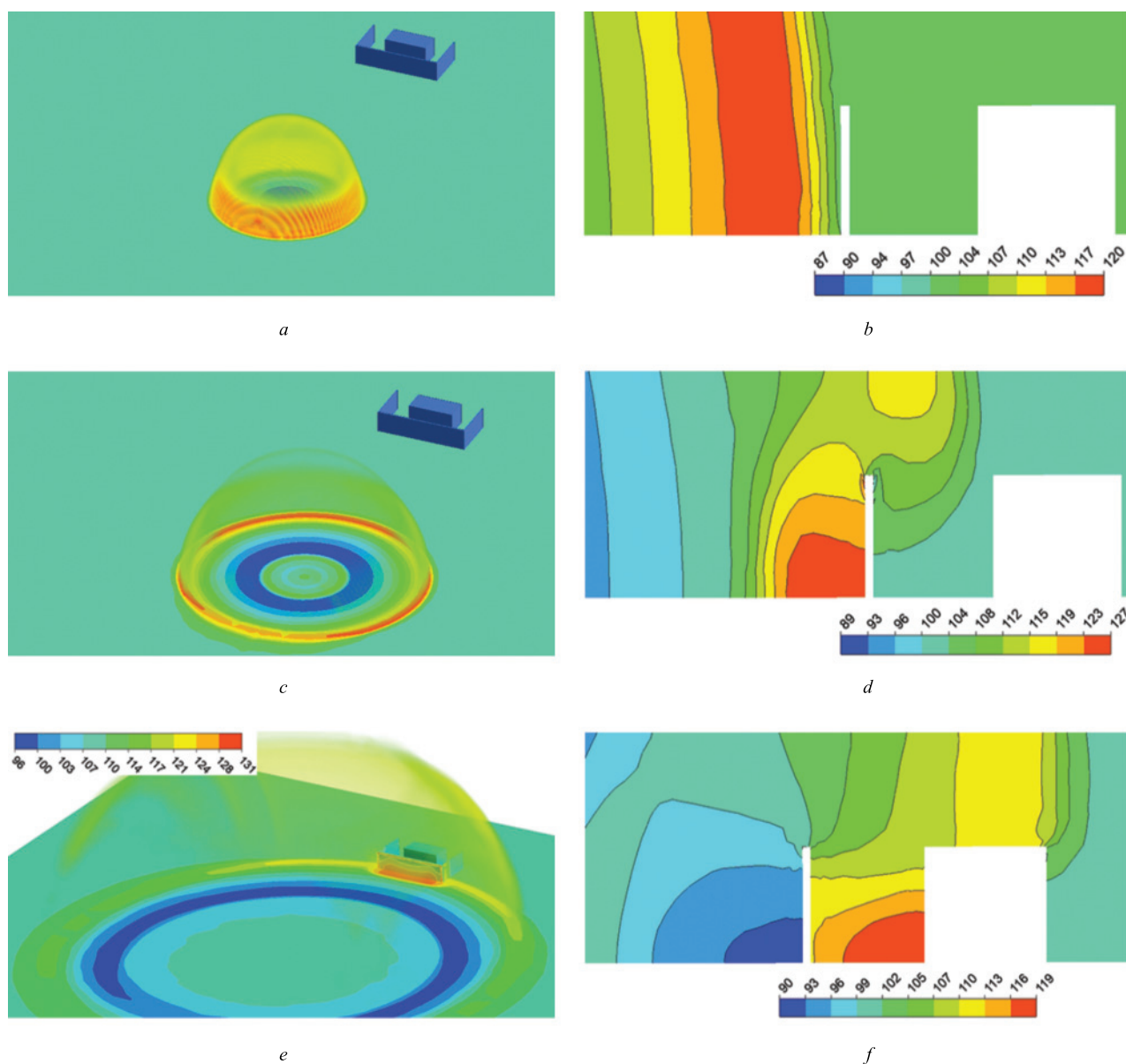


Рис. 2. Распределение давления (кПа): *a, c, e* — в объеме; *b, d, f* — в поперечном сечении модели

Fig. 2. Pressure distribution (kPa): *a, c, e* — volume-wise distribution; *b, d, f* — cross sectional distribution

Для измерения параметров УВ датчики давления, которые располагались на уровне грунта между зарядом ВВ и моделью на расстоянии 6 и 13 м, а также на гранях модели (см. рис. 1).

Результаты численного моделирования

Расчеты выполнялись в ПК Ansys Fluent в трехмерной нестационарной постановке задачи. Для решения систем уравнений в ANSYS Fluent использовался решатель Density-Based, схема AUSM. Математическое моделирование взрыва проводилось

с использованием стандартной модели турбулентности $k - \epsilon$.

На рис. 2 приведены поля избыточного максимального давления в различные моменты времени. На рис. 3 представлены графики динамического давления в характерных точках, полученные экспериментально и в результате численного моделирования.

Обсуждение

В отечественной нормативной базе можно выделить два принципиально отличающихся нормативных

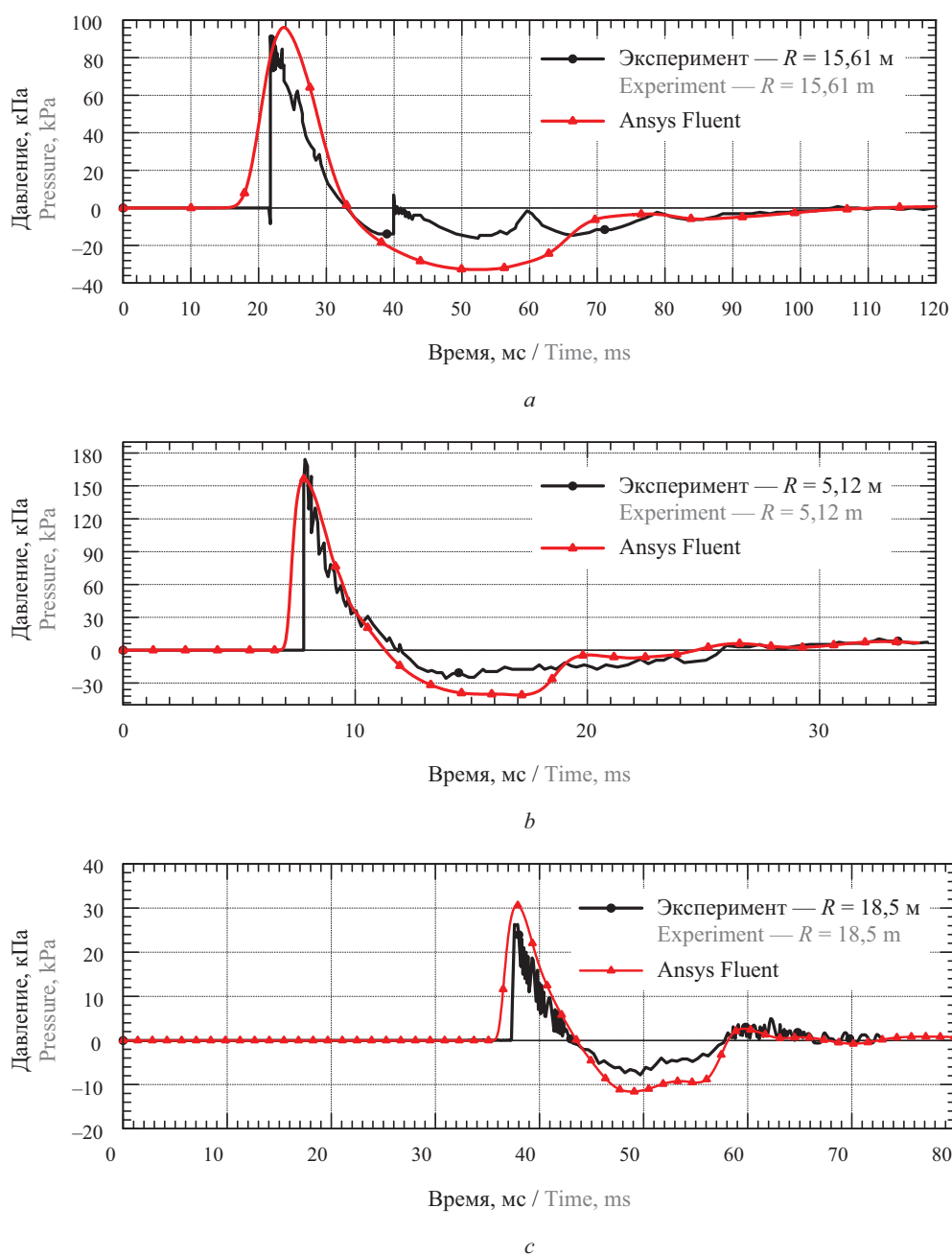


Рис. 3. Динамические параметры взрывного давления: *a* — эксперимент [19]; *b* — эксперимент [20]; *c* — эксперимент НИИ
Fig. 3. Dynamic parameters of the blast pressure: *a* — experiment [19]; *b* — experiment [20]; *c* — experiment conducted by the research institute

документа: РБ Г-05-039-96 и РБ НТЦ ПБ, содержащих положения по расчету параметров нагрузки при взрыве ТВС. За рубежом, в частности в Евросоюзе, помимо численного моделирования (CFD) широко применяется инженерный метод расчета нагрузок от взрыва, описанный в методике TNO CPR 14E⁵, раз-

⁵ CPR 14E. Methods for the calculation of physical effects. "Yellow book" By ed. C.J.H. van den Bosch. R.A. P.M. Weterings. Hague : Gevaarlijke Stoffen. 2005. 870 p.

работанной Голландской организацией (Nederlandse Organisatie voor Toegepast Natuurwetenschappelijk Onderzoek). В настоящей работе было проведено сравнение результатов экспериментов с численным моделированием и результатами расчета по нормативным методикам: РБ Г-05-039-96, РБ НТЦ ПБ, TNO CPR 14E (см. табл. 1).

Следует отметить, что нормативные инженерные методики расчета предусматривают только расчет

Результаты сравнения расчетов с экспериментами

Compared analytical and experimental results

Номер No.	Описание Description	R, м R, m	Параметры взрывной волны Explosive wave parameters			
			P, кПа P, kPa	Δ, %	I, кПа·с I, kPa·s	Δ, %
Тест 1 / Test 1	Эксперимент Groethe M. [19] Groethe M. experiment [19]	15,61	91,54	—	0,45	—
	Расчет CFD CFD Analysis		96,11	5,00	0,83	83,56
	РБ НТЦ ПБ Safety Guidelines of the Academic Technology Centre of Fire Safety		83,15	−9,16	0,40	−10,22
	РБ Г-05-039-96 Safety Guidelines G-05-039-96		106,87	16,75	0,46	2,89
	TNO CPR 14E		133,31	45,63	0,81	79,78
Тест 2 / Test 2	Эксперимент Nozu T. [20] Nozu T. Experiment [20]	5,12	174,23	—	0,06	—
	Расчет CFD CFD analysis		156,32	−10,28	0,32	50,39
	РБ НТЦ ПБ Safety Guidelines of the Academic Technology Centre of Fire Safety		140,75	−19,21	0,18	−12,86
	РБ Г-05-039-96 Safety Guidelines G-05-039-96		188,83	8,38	—	—
	TNO CPR 14E		214,10	22,89	—	—
Тест 3 / Test 3	Эксперимент НИИ Experiment of a research institute	18,50	26,28	—	0,06	—
	Расчет CFD CFD analysis		30,62	16,51	0,12	87,81
	РБ НТЦ ПБ Safety Guidelines of the Academic Technology Centre of Fire Safety		—	—	—	—
	РБ Г-05-039-96 Safety Guidelines G-05-039-96		32,53	23,76	—	—
	TNO CPR 14E		29,24	11,26	—	—

Примечание: R — расстояние от эпицентра взрыва; P — максимальное избыточное давление в УВ; I — максимальное значение импульса; Δ — отклонение от экспериментального значения.

Note: R — distance to ground zero; P — maximal excessive pressure in the compressive wave; I — maximal impulse value; Δ — deviation from the experimental value.

параметров ВУВ без учета взаимодействия с преградами (зданиями или сооружениями). Исключением является методика ЗАО НТЦ ПБ, в которой приведены соотношения для параметров отраженной УВ при ее нормальном падении на преграду. Это обстоятельство накладывает существенные ограничения на применение инженерных методик расчета в практике проектирования, поскольку проектируемые площадки бывают достаточно часто сильно загромождены. По этой причине в табл. 1 для экспериментов 2 и 3 отсутствуют результаты расчетов значения импульсов для точек на поверхности преграды. Рассчитанные по нормативным методикам давления P в табл. 1 для экспериментов 2 и 3 определялись из известного соотношения для пикового давления отражения, включенного также в СП 296.1325800.2017:

$$P = 2P_s \frac{7P_0 + 4P_s}{7P_0 + P_s}, \quad (9)$$

где P_s — максимальное избыточное давление на фронте волны.

Анализ результатов численного моделирования взрыва показал, что расчетные и экспериментальные кривые давления достаточно хорошо согласуются между собой (см. рис. 3). Максимальные избыточные давления незначительно отличаются от экспериментальных данных (см. таблицу), что, как правило, достаточно для прикладных инженерных расчетов.

Исходя из анализа полей распределения давления установлено, что защитная стена снижает до двух раз давление ВУВ для защищаемого здания. Давление

на передней грани защитной стены составило $P_{\text{макс}} \approx 30$ кПа, тогда как давление на передней грани модели $P_{\text{макс}} \approx 13$ кПа.

Выводы

Проведенное численное моделирование распространения взрывной волны при различных условиях показало качественное и количественное совпадение с рассматриваемыми экспериментами. Во всех рассчитанных тестах имеется значительный запас по импульсу в сравнении с экспериментальными данными. Также можно выделить совпадение расчетных эпюр давления с экспериментальными. Полученные в ходе численного моделирования эпюры давления могут быть применены в динамическом расчете строительных конструкций.

Рассмотренный расчетный метод позволяет достаточно точно реализовать профиль давления на любую поверхность здания или сооружения при внешнем детонационном взрыве ТВС и оценить несущую способность строительных конструкций. Что подтверждается результатами сравнения различных экспериментов с численным моделированием. Общий принцип, заложенный в этом методе, может быть использован при моделировании распространения и взаимодействия взрывной волны со зданиями и сооружениями как при взрыве ТВС, так и при взрыве конденсированных ВВ.

Таким образом, предложенный подход к расчету нагрузок при внешнем детонационном взрыве ТВС может применяться при проектировании зданий или сооружений различной конфигурации.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Хуснутдинов Д.З., Мишуев А.В., Казеннов В.В., Комаров А.А., Громов Н.В. Аварийные взрывы газозвушных смесей в атмосфере. М. : МГСУ. 2014. 80 с.
2. Комаров А.А. Прогнозирование нагрузок от аварийных дефлаграционных взрывов и оценка последствий их воздействия на здания и сооружения : дис. ... д-ра техн. наук. М. 2001. 492 с.
3. Шаргатов В.А., Сумской С.И., Софьин А.С. Верификация модели распространения волн избыточного давления программного комплекса TOXI+CFD // Безопасность труда в промышленности. 2018. № 5. С. 44–52. DOI: 10.24000/0409-2961-2018-6-44-52
4. Комаров А.А., Бажина Е.В. Определение уровня взрывоопасности городской застройки, прилегающей к энергоемким объектам // Природообустройство. 2019. № 2. С. 105–109. DOI: 10.34677/1997-6011/2019-2-105-109
5. Remennikov A.M., Rose T.A. Modelling blast loads on buildings in complex city geometries // Computers and Structures. 2005. Vol. 83. Issue 27. Pp. 2197–2205. DOI: 10.1016/j.compstruc.2005.04.003
6. Lucas M., Skjold T., Hisker H. Computational fluid dynamics simulations of hydrogen releases and vented deflagrations in large enclosures // Journal of Loss Prevention in the Process Industries. 2020. Vol. 63. P. 103999. DOI: 10.1016/j.jlp.2019.103999
7. Zibarov A.V. Gasdynamicstool package — system for numerical gas dynamic non-steady process modeling // ASME. 1999. Vol. 397-1. Pp. 117–123.

8. *Molkov V.V., Cirrone D.M.C., Shentsov V.V., Dery W., Kim W., Makarov D.V.* Blast wave and fireball after hydrogen tank rupture in a fire // *Advances in Pulsed and Continuous Detonations : Collected papers* / Edited by S.M. Frolov. Moscow. 2019. Pp. 260–274. DOI: 10.30826/ICPCD201821
9. *Bauwens C.R., Dorofeev S.B.* CFD modeling and consequence analysis of an accidental hydrogen release in a large scale facility // *International Journal of Hydrogen Energy*. 2014. Vol. 39. Issue 35. Pp. 20447–20454. DOI: 10.1016/j.ijhydene.2014.04.142
10. *Hansen R., Johnson D.M.* Improved farfield blast predictions from fast deflagrations, DDTs and detonations of vapour clouds using FLACS CFD // *Loss Prevention in the Process Industries*. 2015. Vol. 35. Pp. 293–306. DOI: 10.1016/j.jlp.2014.11.005
11. *Van Den Berg A.C., Mercx W.P.M., Mouilleau Y., Hayhurst C.J.* AutoReaGas – A CFD – Tool for gas explosion hazard analysis // *TNO Prins Maurits Laboratory*. 1994. 15 p.
12. *Chern Jinn Gan E., Remennikov A.M., Ritzel D.* Investigation of trees as natural protective barriers using simulated blast environment // *International Journal of Impact Engineering*. 2021. Vol. 158. P. 104004. DOI: 10.1016/j.ijimpeng.2021.104004
13. *Vyazmina E., Jallais S., Beccantini A., Trelat S.* CFD design of protective walls against the effects of vapor cloud fast deflagration of hydrogen // *ICHHS 6th*, Yokohama, Japan. 2015.
14. *Jallais S., Vyazmina E., Miller D., Thomas J.K.* Hydrogen jet vapor cloud explosion: A model for predicting blast size and application to risk assessment // *Process Safety Progress*. 2018. Vol. 37. Issue 3. Pp. 397–410. DOI: 10.1002/prs.11965
15. *Smith P.D., Rose T.A.* Blast wave propagation in city streets — an overview // *Progress in Structural Engineering and Materials*. 2006. Vol. 8. Pp. 16–28.
16. *Kim D., Kim J.* Numerical method to simulate detonative combustion of hydrogen-air mixture in a containment // *Engineering Applications of Computational Fluid Mechanics*. 2019. Vol. 13. Issue 1. Pp. 938–953. DOI: 10.1080/19942060.2019.1660219
17. *Brode H.L.* Numerical solutions of spherical blast waves // *Journal of Applied Physics*. 1955. Vol. 26. Issue 6. Pp. 766–775.
18. *Larcher M., Casadei F.* Explosions in complex geometries — a comparison of several approaches // *International Journal of Protective Structures*. 2010. Vol. 1. Issue. 2. Pp. 169–195.
19. *Groethe M., Merilo E., Colton J., Chiba S., Sato Y., Iwabuchi H.* Large-scale hydrogen deflagrations and detonations // *International Journal of Hydrogen Energy*. 2007. Vol. 32. Pp. 2125–2133. DOI: 10.1016/j.ijhydene.2007.04.016
20. *Nozu T., Tanaka R., Ogawa T., Hibi K., Sakai Y.* Numerical simulation of hydrogen explosion tests with a barrier wall for blast mitigation // *1st International Conference on Hydrogen Safety*, Pisa, 8–10 September. 2005.

REFERENCES

1. *Khusnutdinov D.Z., Mishuev A.V., Kazennov V.V., Komarov A.A., Gromov N.V.* *Crash explosions of gas-air mixtures in the atmosphere*. Moscow, MGSU Publ., 2014; 80. (rus).
2. *Komarov A.A.* *Predicting loads from emergency deflagration explosions and assessing the consequences of their impact on buildings and structures : dissertation ... doctor of technical sciences*. Moscow, 2001; 492. (rus).
3. *Shargatov V.A., Sumskoi S.I., Sofyin A.S.* Verification of the model of overpressure waves propagation in the TOXI+CFD software. *Occupational Safety in Industry*. 2018; 5:44-52. DOI: 10.24000/0409-2961-2018-6-44-52 (rus).
4. *Komarov A.A., Bazhina E.V.* Determination of the explosive level of the urban site development adjacent to power-intensive objects. *Prirodoobustrojstvo*. 2019; 2:105-109. DOI: 10.34677/1997-6011/2019-2-105-109 (rus).
5. *Remennikov A.M., Rose T.A.* Modelling blast loads on buildings in complex city geometries. *Computers and Structures*. 2005; 83(27):2197-2205. DOI: 10.1016/j.compstruc.2005.04.003
6. *Lucas M., Skjold T., Hisklen H.* Computational fluid dynamics simulations of hydrogen releases and vented deflagrations in large enclosures. *Journal of Loss Prevention in the Process Industries*. 2020; 63:103999. DOI: 10.1016/j.jlp.2019.103999
7. *Zibarov A.V.* Gasdynamicstool package — System for numerical gas dynamic nonsteady process modeling. *ASME*. 1999; 397-1:117-123.
8. *Molkov V.V., Cirrone D.M.C., Shentsov V.V., Dery W., Kim W., Makarov D.V.* Blast wave and fireball after hydrogen tank rupture in a fire. *Advances in Pulsed and Continuous Detonations: Collected papers*. S.M. Frolov (ed.). Moscow. 2019; 260-274. DOI: 10.30826/ICPCD201821

9. Bauwens C.R., Dorofeev S.B. CFD modeling and consequence analysis of an accidental hydrogen release in a large scale facility. *International Journal of Hydrogen Energy*. 2014; 39(35):20447-20454. DOI: 10.1016/j.ijhydene.2014.04.142
10. Hansen R., Johnson D.M. Improved farfield blast predictions from fast deflagrations, DDTs and detonations of vapour clouds using FLACS CFD. *Loss Prevention in the Process Industries*. 2015; 35:293-306. DOI: 10.1016/j.jlp.2014.11.005
11. Van Den Berg A.C., Mercx W.P.M., Mouilleau Y., Hayhurst C.J. AutoReaGas – A CFD – Tool for gas explosion hazard analysis. *TNO Prins Maurits Laboratory*. 1994; 15.
12. Chern Jinn Gan E., Remennikov A.M., Ritzel D. Investigation of trees as natural protective barriers using simulated blast environment. *International Journal of Impact Engineering*. 2021; 158:104004. DOI: 10.1016/j.ijimpeng.2021.104004
13. Vyazmina E., Jallais S., Beccantini A., Trelat S. CFD design of protective walls against the effects of vapor cloud fast deflagration of hydrogen. *ICHS 6th*. Yokohama, Japan, 2015.
14. Jallais S., Vyazmina E., Miller D., Thomas J.K. Hydrogen jet vapor cloud explosion: A model for predicting blast size and application to risk assessment. *Process Safety Progress*. 2018; 37(3):397-410. DOI: 10.1002/prs.11965
15. Smith P.D., Rose T.A. Blast wave propagation in city streets — an overview. *Progress in Structural Engineering and Materials*. 2006; 8:16-28.
16. Kim D., Kim J. Numerical method to simulate detonative combustion of hydrogen-air mixture in a containment. *Engineering Applications of Computational Fluid Mechanics*. 2019; 13(1):938-953. DOI: 10.1080/19942060.2019.1660219
17. Brode H.L. Numerical solutions of spherical blast waves. *Journal of Applied Physics*. 1955; 26(6):766-775.
18. Larcher M., Casadei F. Explosions in complex geometries — a comparison of several approaches. *International Journal of Protective Structures*. 2010; 1(2):169-195.
19. Groethe M., Merilo E., Colton J., Chiba S., Sato Y., Iwabuchi H. Large-scale hydrogen deflagrations and detonations. *International Journal of Hydrogen Energy*. 2007; 32:2125-2133. DOI: 10.1016/j.ijhydene.2007.04.016
20. Nozu T., Tanaka R., Ogawa T., Hibi K., Sakai Y. Numerical simulation of hydrogen explosion tests with a barrier wall for blast mitigation. *1st International Conference on Hydrogen Safety, Pisa, 8-10 September, 2005*.

Поступила 22.10.2021, после доработки 29.11.2021; принята к публикации 01.02.2022

Received October 22, 2021; Received in revised form November 29, 2021; Accepted February 1, 2022

Информация об авторах

ЛИПЛЕНКО Максим Александрович, канд. техн. наук, старший научный сотрудник отдела технологии строительства и ремонта, Научно-исследовательский институт трубопроводного транспорта, Россия, 117186, г. Москва, Севастопольский пр-т, 47а; РИНЦ ID: 761794; ORCID: 0000-0001-7640-6072; e-mail: LiplenkoMA@gmail.com

БОРОДЕНКО Александр Николаевич, старший научный сотрудник отдела технологии строительства и ремонта, Научно-исследовательский институт трубопроводного транспорта, Россия, 117186, г. Москва, Севастопольский пр-т, 47а; ORCID: 0000-0003-2549-9066; e-mail: canchecc@rambler.ru

МОСОЛОВ Георгий Владимирович, канд. техн. наук, начальник отдела технологии строительства и ремонта, Научно-исследовательский институт трубопроводного транспорта, Россия, 117186, г. Москва, Севастопольский пр-т, 47а; РИНЦ ID: 884901; ORCID: 0000-0001-7949-1022; e-mail: mosolovgv@mail.ru

Information about the authors

Maxim A. LIPLENKO, Cand. Sci. (Eng.), Senior Researcher, Department of Civil and Industrial Engineering, Pipeline Transport Institute, 47a, Sevastopolskiy Prospect, Moscow, 117186, Russian Federation; ID RISC: 761794; ORCID: 0000-0001-7640-6072; e-mail: LiplenkoMA@niitnn.transneft.ru

Alexandr N. BORODENKO, Senior Researcher, Department of Civil and Industrial Engineering, Pipeline Transport Institute, 47a, Sevastopolskiy Prospect, Moscow, 117186, Russian Federation; ORCID: 0000-0003-2549-9066; e-mail: canchecc@rambler.ru

Georgiy V. MOSOLOV, Cand. Sci. (Eng.), Head of Department of Civil and Industrial Engineering, Pipeline Transport Institute, 47a Sevastopolskiy Prospect, Moscow, 117186, Russian Federation; ID RISC: 884901; ORCID: 0000-0001-7949-1022; e-mail: mosolovgv@mail.ru

Вклад авторов:

Липленко М.А. — разработка методики расчета, проведение численного моделирования, оформление результатов расчетов, написание текста статьи, составление заключения.

Бороденко А.Н. — участие в экспериментальных исследованиях, оформление результатов экспериментальных исследований, доработка текста статьи.

Мосолов Г.В. — научное руководство, участие в разработке программы и методики испытаний, составление заключения.

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Contribution of the authors:

Maxim A. Liplenko — development of a calculation method, carrying out numerical modeling, formalizing the calculation results, writing the text of an article, final conclusions.

Alexandr N. Borodenko — participation in experimental research, registration of the results of experimental research, revision of the text of the article.

Georgiy V. Mosolov — scientific management, participation in the development of the test program and methodology, final conclusions.

The authors declare no conflicts of interests.

ПОЖАРОВЗРЫВБЕЗОПАСНОСТЬ/FIRE AND EXPLOSION SAFETY. 2022. Т. 31. № 1. С. 99–104
 POZHAROVZRYVOBEZOPASNOST/FIRE AND EXPLOSION SAFETY. 2022; 31(1):99-104

УДК 614.849/311.3

<https://doi.org/10.22227/0869-7493.2022.31.01.99-104>

Пожарная опасность больших переходных сопротивлений. От теории к практике. Часть 2

Александр Сергеевич Харламенков✉

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

АННОТАЦИЯ

Рассмотрены различные типы контактных соединений и способы предотвращения появления на них больших переходных сопротивлений. Представлены нормы по проведению планово-предупредительных ремонтов с целью поддержания в исправном состоянии мест контакта. Выполнен анализ различных технических решений по защите электрических сетей от больших переходных сопротивлений. Показаны способы контроля и мониторинга состояния потенциально опасных контактных участков электрической сети. Даны рекомендации по совместному применению организационных мероприятий и технических средств для решения вопросов обеспечения пожарной безопасности электроустановок зданий.

Ключевые слова: пожарная безопасность; электрооборудование; изоляция; электропроводка; измерительные приборы; электрические розетки; клавишные выключатели; аппараты защиты

Для цитирования: Харламенков А.С. Пожарная опасность больших переходных сопротивлений. От теории к практике. Часть 2 // Пожаровзрывобезопасность/Fire and Explosion Safety. 2022. Т. 31. № 1. С. 99–104. DOI: 10.18322/PVB.2022.31.01.99-104

✉ Харламенков Александр Сергеевич, e-mail: h_a_s@live.ru

The fire hazard of large transition resistances. From theory to practice. Part 2

Aleksandr S. Kharlamenkov✉

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

ABSTRACT

The author addresses various types of contact joints and methods of preventing the emergence of large transient resistances on them. The article has guidelines governing regular preventive repair works aimed at the maintenance of contact points. The analysis of various technical solutions for the protection of power grids from high transient resistances has been conducted. The author demonstrates methods used to control and monitor the condition of potentially dangerous contact sections of a power grid. The author makes recommendations on the joint application of management actions and technical facilities to address fire safety issues of electrical installations of buildings.

Keywords: fire safety; electrical equipment; insulation; wiring; measuring instruments; electrical outlets; key switches; protective devices

For citation: Kharlamenkov A.S. The fire hazard of large transition resistances. From theory to practice. Part 2. *Pozharovzryvobezopasnost/Fire and Explosion Safety*. 2022; 31(1):99-104, DOI: 10.18322/PVB.2022.31.01.99-104 (rus).

✉ Aleksandr Sergeevich Kharlamenkov, e-mail: h_a_s@live.ru



ВОПРОС

В предыдущем журнале № 6 за 2021 год в рубрике «Вопрос-ответ» [1] были рассмотрены основные теоретические положения теории контакта и определены основные факторы, оказывающие влияние на конечную величину переходного сопротивления. В результате анализа обобщенных данных было уста-

новлено, что обнаружение больших переходных сопротивлений (БПС) на практике можно реализовать путем контроля (мониторинга):

- силы контактного нажатия;
- температуры контакт-деталей и мест их соединения;
- падения напряжения или переходного сопротивления в контактном соединении;

- температуры изоляционных материалов и конструктивных элементов электрических изделий, соприкасающихся или находящихся вблизи контактов-деталей;
- появления электрической дуги (искрений) в местах ослабления контактов;
- внешнего вида и наличия деформаций, повреждений, запыленности, окисления разъемных элементов.

Вышеперечисленные пути решения проблемы БПС осуществляются не только инструментальными методами измерений, но и проведением профилактических мероприятий. В совокупности данные меры позволят снизить число пожаров от электроустановок, в том числе и в случае БПС.

Отдельные шаги в этом направлении предпринимаются МЧС России, разработавшим в 2020 г. «Методику проведения профилактической работы в жилом секторе» [2]. Данной Методикой предусматривается проведение организационно-профилактических мероприятий по повышению уровня пожарной безопасности жилых помещений, осуществляемых совместно с органами местного самоуправления и общественных социально ориентированных некоммерческих объединений. Одной из мер является замена и ремонт электропроводки в жилых помещениях, что можно обосновать значительным числом пожаров по причине неисправности электропроводки — более 70 % [3]. При успешной реализации данной Методики [2] можно ожидать снижения числа пожаров и уменьшения опасных случаев из-за перегрузок, коротких замыканий и БПС в электрических сетях.

Но есть и другая нерешенная проблема, связанная с организацией регулярных плановых осмотров и обслуживания электрических сетей в жилых домах. Замена проводки с истекшим сроком службы — это необходимая мера, но и регулярные проверки ее исправного состояния тоже немаловажная задача. Так как 90 % жилого фонда в России находится в собственности самих граждан, то и ответственность за поддержание исправного состояния электроустановок в помещениях ложится на их плечи. Собственникам следует уделять больше внимания данным вопросам и не экономить на своевременном обслуживании электропроводки и электроустановочных изделий (розеток, выключателей и т.д.). Замена израсходовавших свой ресурс кабелей и электроустановочных изделий на новые позволит предупредить и предотвратить пожары из-за неисправности электроустановок.

В случае появления неисправностей в работе электрических сетей и приборов применение современных систем контроля (мониторинга) в совокупности с аппаратами защиты позволит снизить число пожароопасных ситуаций. Это обстоятельство также касается пожаров по причине БПС. Возникает естественный вопрос, какие современные технические решения могут использоваться для обнаружения БПС в электрических сетях зданий?

ОТВЕТ

Как отмечалось в предыдущей части статьи [1], появление БПС чаще происходит в местах разрывных (разъемных) и скользящих контактов, нежели неподвижных (зажимных и цельнометаллических).

Поэтому в отдельных видах соединений ожидать БПС не следует. Например, в выполненных с помощью сварки, пайки и опрессовки с последующей изоляцией соединения с помощью термоусадочных (термоусаживаемых) трубок (ТУТ). Согласно п. 6.2.3 СП 76.13330.2016¹, эти соединения считаются необслуживаемыми.

Общие требования к электроизоляционным трубкам представлены в ГОСТ 17675–87². В этом стандарте отмечается, что правила применения, «способы и режимы усадки указывают в стандартах или технических условиях на трубки конкретных марок». Далеко не все виды ТУТ обеспечивают защиту соединений от воздействия влаги, которая ведет к ухудшению качества контакта. В этих случаях рекомендуется применять термоусадочные трубки с внутренним клеевым слоем.

Для большинства современных кабелей предъявляются требования ГОСТ 31565-2012³ к их изоляции и оболочке. Они имеют ряд показателей пожарной опасности, таких как: распространение горения (нг); дымо- и газовыделение (LS); выделение коррозионно-активных газообразных продуктов (HF); огнестойкость (FR); токсичность продуктов горения (LTx). Аналогичные требования предъявляются к изоляции мест соединений, где применяются ТУТ с различными показателями, обычно «нг» и «нг-LS». В результате использования ТУТ совместно с контактными соединениями, выполненными сваркой, спайкой и опрессовкой, достигается высокая надежность и долговечность последних без появления БПС.

Наибольшую проблему представляют БПС в местах клеммных и болтовых, а также разъемных соединений электроустановочных изделий. Данные контакты обычно не защищены от внешних воздействий окружающей среды, поэтому более подвержены окислительным процессам и появлению БПС. Их исправное состояние может поддерживаться за счет проведения планово-предупредительных ремонтов (ППР) и контроля с помощью специальных технических средств.

Выполнение ППР контактных соединений регламентируется различными нормативными документами. К ним относятся: Правила технической эксплуатации электроустановок потребителей⁴ (ПТЭЭП), ГОСТ Р 56536-2015⁵, а также

¹ СП 76.13330.2016. Электротехнические устройства. Актуализированная редакция СНиП 3.05.06–85: введен в действие 17 июня 2017 г. М. : Стандартинформ, 2017.

² ГОСТ 17675–87. Трубки электроизоляционные гибкие. Общие технические условия: введен в действие 1 января 1990 г. М. : Издательство стандартов, 1988.

³ ГОСТ 31565–2012. Кабельные изделия. Требования пожарной безопасности (Переиздание): введен в действие 1 января 2014 г. в ред. 1 сентября 2019 г. М. : Стандартинформ, 2019.

⁴ ПТЭЭП. Правила технической эксплуатации электроустановок потребителей: утв. приказом Минэнерго РФ № 6 от 13 января 2003 г.; введ. 1 июля 2003 г. в ред. 13 сентября 2018 г. Российская газета. 2003. № 139.

⁵ ГОСТ Р 56536–2015. Услуги жилищно-коммунального хозяйства и управления многоквартирными домами. Услуги содержания внутридомовых систем электроснабжения многоквартирных домов. Общие требования (Переиздание): введен в действие 1 апреля 2016 г. в ред. 1 февраля 2020 г. М. : Стандартинформ, 2020.

ведомственные нормативные документы и стандарты организаций, например, И 1.09-10⁶, СТО МИ 71.12.19⁷ и т.п. Указанные нормы устанавливают общий перечень работ по обслуживанию и ремонту контактных соединений, включающих в себя их визуальный осмотр, очистку от грязи (пыли), подтяжку, смазку, измерение температуры и т.д. В случае обнаруженных нарушений целостности или ослабления контакта при визуальном осмотре следует восстанавливать соединения немедленно. Периодичность проверок должна указываться в инструкциях по ППР и проводиться не реже 2 раз в год.

В качестве специальных технических средств для контроля (мониторинга) надежности контакта, его температуры и величины переходного сопротивления используются различные измерительные приборы (микро- и миллиметры и т.д.), приборы теплового контроля (пирометры, тепловизоры), термоиндикаторные наклейки и стикеры, газоаналитические системы обнаружения перегрева мест контакта.

С помощью микро- и миллиметров измеряют переходные сопротивления выключателей, разъединителей, болтовых и др. контактных соединений. В прил. 14 ГОСТ 28249–93⁸ представлены значения переходных сопротивлений контактных соединений (R_n) кабелей, разъемных контактов коммутационных аппаратов и шинопроводов. Величина сопротивления зависит от сечения проводников, номинальных токов шинопроводов и аппаратов и варьируется в широких пределах. Так, для кабелей с алюминиевыми жилами сечением 16–240 мм² значение R_n изменяется в диапазоне от 85–12 мОм. Для шинопроводов на номинальные токи 250–4000 А сопротивление R_n составляет 9–1 мОм. Приближенные значения сопротивлений разъемных контактов коммутационных аппаратов представлены в табл. 1.

Исходя из представленных значений R_n в прил. 14 ГОСТ 28249–93 можно сделать вывод, что для сечений проводников электрических сетей менее 16 мм² переходные сопротивления контактов будут составлять величины более 100 мОм, а для разъемных соединений аппаратов с номинальными токами менее 50 А величина $R_n \geq 1,5$ мОм.

Измерение петли «фаза-ноль» также позволяет выявить появление больших переходных сопротивлений при замере общего сопротивления цепи и предупредить пожароопасные ситуации в электрической сети. В ПТЭЭП нет конкретных временных рамок по проведению таких замеров, но в большинстве случаев они проводятся не реже 1 раза в 3 года, для взрывоопасных зон эта проверка должна выполняться не реже 1 раза в 2 года (п. 3.4.12 ПТЭЭП).

⁶ И 1.09–10. Инструкция по соединению изолированных жил проводов и кабелей: введен в действие 1 января 2011 г. М. : Ассоциация «Росэлектромонтаж», 2010.

⁷ СТО МИ 71.12.19. Организация технической эксплуатации инженерных систем жилых зданий: введен в действие 6 апреля 2009 г. с изм. № 1–3 25 февраля 2014 г. М. : ЗАО «ЦНИИПСК им. Мельникова», 2014.

⁸ ГОСТ 28249–93. Короткие замыкания в электроустановках. Методы расчета в электроустановках переменного тока напряжением до 1 кВ : введен в действие 1 января 1995 г. М. : Издательство стандартов, 1994.

Таблица 1. Активное сопротивление разъемных соединений для различных коммутационных аппаратов напряжением до 1 кВ

Номинальный ток аппарата, А	Активное сопротивление разъемных соединений, мОм		
	Автоматического выключателя	Рубильника	Разъединителя
50	1,30	–	–
70	1,00	–	–
100	0,75	0,50	–
150	0,65	–	–
200	0,60	0,40	–
400	0,40	0,20	0,20
600	0,25	0,15	0,15
1000	0,12	0,08	0,08

Появление БПС разъемных соединений клавишных выключателей и розеток следует ожидать по истечении срока службы (числа циклов), когда механизмы коммутации и техническое состояние контактов уже не позволяют обеспечивать их надежность. В ГОСТ Р 51324.1–2012⁹ и ГОСТ ИЕС 61058-1–2012¹⁰ указывается различное число циклов включения клавишных выключателей, при которых должно сохраняться качество контакта. Бытовые клавишные выключатели рассчитаны на 40–50 тыс. циклов. В отдельных случаях это значение может составлять 25 тыс., но не более 200 тыс. циклов. Например, срок эксплуатации клавишных выключателей при их включении/отключении 10 раз в сутки при нормативном значении 50 тыс. циклов составит около 14 лет.

Указание на срок эксплуатации бытовых розеток в нормативных документах отсутствует, но в большинстве случаев производители указывают значение не менее 15 лет ($\approx 10\,000$ циклов). По ГОСТ 30988.1–2020¹¹, ГОСТ ИЕС 60309-1–2016¹² розетки проходят испытания на 50 циклов коммутации с вилкой. При этом качество

⁹ ГОСТ Р 51324.1–2012 (МЭК 60669-1:2007). Выключатели для бытовых и аналогичных стационарных электрических установок. Часть 1. Общие требования: введен в действие 1 января 2014 г. М. : Стандартинформ, 2014.

¹⁰ ГОСТ ИЕС 61058-1–2012. Выключатели для электроприборов. Часть 1. Общие требования: введен в действие 1 июля 2014 г. М. : Стандартинформ, 2014.

¹¹ ГОСТ 30988.1–2020 (ИЕС 60884-1:2013). Соединители электрические штепсельные бытового и аналогичного назначения. Часть 1. Общие требования и методы испытаний: введен в действие 1 марта 2021 г. М. : Стандартинформ, 2020.

¹² ГОСТ ИЕС 60309-1–2016. Вилки, штепсельные розетки и соединительные устройства промышленного назначения. Часть 1. Общие требования: введен в действие 1 июля 2018 г. М. : Стандартинформ, 2017.

контактного соединения должно оставаться неизменным. Такое испытание может подтвердить гарантийный срок службы изделия (обычно 2 года). Время его безопасной эксплуатации будет зависеть от частоты использования розетки (степени износа разъемов), величины протекающих через нее токов, условий окружающей среды (температура, влажность). Для увеличения надежности соединения разъемов розетки и штекера отдельные производители применяют подпружиненные контакты, которые обеспечивают достаточную силу нажатия при их частом использовании.

Тепловой контроль контактных соединений выполняется периодически или в виде постоянного мониторинга. С помощью пирометров и тепловизоров измеряется фактическая температура контактных соединений при проведении ППР. Методика инфракрасной (ИК) диагностики электрооборудования представлена в РД 153-34.0-20.363–99¹³. При выполнении ИК диагностики следует учитывать множество факторов: коэффициент излучения материала; солнечную радиацию; скорость ветра; расстояние до объекта; угол замера показаний; значение токовой нагрузки; тепловое отражение и т.д. [4]. Периодичность измерений переходных контактных соединений с помощью тепловизионного контроля по РД 34.45-51.300–97¹⁴ проводится не реже 1 раза в 3 года.

При этом следует руководствоваться требованиями ГОСТ 10434–82¹⁵, ГОСТ 403–73¹⁶ и ГОСТ 30851.2.2–2002¹⁷ по наибольшей допустимой температуре нагрева контактных соединений при протекании номинального (длительно допустимого) тока (см. табл. 2).

Непрерывный мониторинг состояния контактных соединений может выполняться тепловизионным реле защиты [5]. Данное устройство выполняет непрерывный контроль температуры прямоугольного участка плоскости и автоматически выявляет недопустимый перегрев в местах контакта. Устройство можно интегрировать в систему сигнализации объекта защиты и выполнять дистанционное управление и удаленное визуальное наблюдение за состоянием соединений в виде тепловой карты.

¹³ РД 153-34.0-20.363–99. Основные положения методики инфракрасной диагностики электрооборудования и ВЛ: введен в действие 1 июня 2000 г. М. : СПО ОРГРЭС, 2001.

¹⁴ РД 34.45-51.300–97. Объем и нормы испытаний электрооборудования, 6-е издание: введен в действие 8 мая 1997 г. в ред. 1 октября 2006 г. М. : ЗАО «Издательство НЦ ЭНАС», 2008.

¹⁵ ГОСТ 10434–82. Соединения контактные электрические. Классификация. Общие технические требования (с Изм. № 1, 2, 3): введен в действие 1 января 1983 г. в ред. 1 июня 2007 г. М. : Стандартинформ, 2007.

¹⁶ ГОСТ 403–73. Аппараты электрические на напряжение до 1000 В. Допустимые температуры нагрева частей аппаратов: введен в действие 1 января 1974 г. в ред. 1 октября 2003 г. М. : ИПК Издательство стандартов, 2003.

¹⁷ ГОСТ 30851.2.2–2002 (МЭК 60320-2-2:1998). Соединители электрические бытового и аналогичного назначения. Часть 2-2. Дополнительные требования к вилкам и розеткам для взаимного соединения в приборах и методы испытаний: введен в действие 1 января 2014 г. М. : Стандартинформ, 2014.

Таблица 2. Наибольшая температура контактных соединений и выводов аппаратов защиты в электроустановках напряжением до 1000 В

Характеристика соединяемых проводников	Наибольшая допустимая температура нагрева, °С
Проводники из меди, алюмомеди, алюминия и его сплавов:	
• без защитных покрытий рабочих поверхностей	95
• с защитными покрытиями рабочих поверхностей благородными металлами	110
Проводники из меди и ее сплавов без изоляции или с изоляцией классов В, F и H с защитным покрытием рабочих поверхностей серебром	135
Ответные контактные гнезда штепсельной приборной розетки:	
• при температуре окружающей среды 25 °С с допустимым временным увеличением до 35 °С	65
• при испытании переменным током 1,25 в течение 1 ч, превышение температуры не более от номинального значения	45
Контактные зажимы бытовых выключателей при пропускании испытательного тока, превышение температуры не более от номинального значения по ГОСТ Р 51324.1–2012	45

Кроме этого, для преждевременного обнаружения мест БПС можно использовать термоиндикаторные наклейки и стикеры, которые устанавливаются вблизи мест контакта [6]. Принцип их действия основан на необратимом изменении цвета отдельных участков (индикаторов) наклеек при увеличении температуры клемм в диапазоне 50–120 °С (см. рис. 1).

Для удаленного контроля состояния контактных соединений и предупреждения персонала возможно применение специализированных газовых датчиков совместно с индикаторными наклейками (газоаналитическая система непрерывного мониторинга контактных соединений)¹⁸ [7]. В случае превышения температуры выше 100 наклейка выделяет сигнальный газ, улавливаемый датчиком, который передает сигнал тревоги и/или отключает питание аварийного участка (см. рис. 2).

На рынке аппаратов защиты появилось устройство защиты от дуговых пробоев/искрений (УЗДП или УЗиС), которое способно в случае значительных ослаблений контактных соединений с образованием дуговых пробоев обнаружить последние и обесточить неисправный участок. Более

¹⁸ РЭ 40416503–2018. Руководство по эксплуатации. Газоаналитическая система автоматического обнаружения перегрева элементов распределительных устройств «Термосенсор». М. : ООО «ТермоЭлектрика», 2019. 70 с.



Рис. 1. Общий принцип действия индикаторных наклеек и стикеров

подробное описание эффективности данных устройств в борьбе с переходными сопротивлениями и дугowymi пробоями дано в рубрике «Вопрос-ответ» журнала № 5 за 2021 год [8].

В целях установления причины пожара существуют методы выявления следов БПС в местах контактных соединений. К таким методам относятся: растровая электронная микроскопия (РЭМ); оптическая микроскопия с компьютерным анализатором изображения; дополнительный рентгеноструктурный анализ (РСА) медных проводников. Подробное описание применения каждого метода представлено в Методических рекомендациях [9].

Таким образом, существует множество различных способов оценки безопасного состояния контактных соединений электрических цепей, которые при совместном ис-



Рис. 2. Общий принцип действия газоаналитической системы непрерывного мониторинга контактных соединений

пользовании позволяют предотвращать пожароопасные ситуации. Многие технические средства имеют ограниченное применение, в основном для применения на трансформаторных подстанциях и в распределительных устройствах зданий. В перспективе можно ожидать применения данных способов контроля возникновения БПС для групповых электрических сетей жилых зданий.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Харламенков А.С. Пожарная опасность больших переходных сопротивлений. От теории к практике. Часть 1 // Пожаровзрывобезопасность/Fire and Explosion Safety. 2021. Т. 30. № 6. С. 108–113. URL: <https://www.fire-smi.ru/jour/article/view/1062>
2. Методика проведения профилактической работы в жилом секторе. М. : ВНИИПО, 2020. 130 с.
3. Пожары и пожарная безопасность в 2020 году: Статистический сборник / под общ. ред. Д.М. Гордиенко. М. : ВНИИПО. 2021. 112 с.
4. Назаров А.А., Пехотиков В.А., Грузинова О.И., Рябинов Л.И. Проверка пожарной опасности электрооборудования жилых и общественных зданий с помощью тепловизора: метод. рекомендации. М. : ВНИИПО, 2014. 28 с.
5. Пат. на полезную модель RU 202733, МПК H01H 37/52. Тепловизионное реле защиты / Пирогов М.Г., Илюхин Е.В. № 2020138775, заявл. 26.11.2020; опубл. 03.03.2021. Бюл. № 7.
6. Никифоров А.Л., Карасев Е.В., Булгаков Б.В., Животыгина С.Н. Использование термочромных материалов в качестве сигнальных средств предупреждения пожаров в электроустановках // Пожаровзрывобезопасность/Fire and Explosion Safety. 2015. Т. 24. № 9. С. 41–47. DOI: 10.18322/ПВБ.2015.24.09.41-47.
7. Пехотиков В.А., Рябинов А.И., Назаров А.А., Грузинова О.И. Комплекс инновационных решений по повышению пожарной безопасности электрооборудования в процессе его эксплуатации // Актуальные вопросы пожарной безопасности. 2019. № 1. С. 14–19.
8. Харламенков А.С. Целесообразность применения устройств защиты от дугового пробоя // Пожаровзрывобезопасность/Fire and Explosion Safety. 2021. Т. 30. № 2. С. 117–122. URL: <https://www.fire-smi.ru/jour/article/view/983>

9. Чешко И.Д., Лебедев К.Б., Мокряк А.Ю. Экспертное исследование после пожара контактных узлов электрооборудования в целях выявления признаков больших переходных сопротивлений : Методические рекомендации. СПб. : СПб филиал ФГУ ВНИИПО МЧС России. 2008. 25 с.

Материал поступил в редакцию 02.02.2022

Received February 2, 2022

Информация об авторе

ХАРЛАМЕНКОВ Александр Сергеевич, заместитель начальника кафедры специальной электротехники, автоматизированных систем и связи, Академия Государственной противопожарной службы Министерства Российской Федерации по делам гражданской обороны, чрезвычайным ситуациям и ликвидации последствий стихийных бедствий, Россия, 129366, г. Москва, ул. Бориса Галушкина, 4; РИНЦ ID: 763967; e-mail: h_a_s@live.ru

Information about the author

Aleksandr S. KHARLAMENKOV, Deputy Head of Department of Special Electrical Engineering, Automation Systems and Communication, the State Fire Academy of the Ministry of Russian Federation for Civil Defense, Emergencies and Elimination on Consequences of Natural Disasters, Borisa Galushkina St., 4, Moscow, 129366, Russian Federation; ID RISC: 763967; e-mail: h_a_s@live.ru