

3-2024

FIRE and EXPLOSION
SAFETY

ПОЖАРОВЗРЫВО-

БЕЗОПАСНОСТЬ



НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКИЙ ЖУРНАЛ

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

КОМПЛЕКСНАЯ БЕЗОПАСНОСТЬ

пожарная • промышленная • производственная • экологическая

МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ
ВОЗДЕЙСТВИЯ ФРОНТА ЛЕСНОГО ПОЖАРА
НА ОГРАЖДАЮЩИЕ КОНСТРУКЦИИ
ДЕРЕВЯННОГО ЗДАНИЯ В СЕЛЬСКОМ
НАСЕЛЕННОМ ПУНКТЕ





УЧРЕДИТЕЛЬ и ИЗДАТЕЛЬ —

ФГБОУ ВО «Национальный
исследовательский
Московский государственный
строительный университет»

Адрес:

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

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

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

РЕДАКЦИЯ:

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

Адрес редакции:

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

Адрес для переписки:

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

E-mail: info@fire-smi.ru

https://www.fire-smi.ru

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

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

Подписано в печать 26.06.2024.

Выход в свет 28.06.2024.

Формат 60 × 84 1/8. Тираж 2000 экз.

Бумага мелованная матовая.

Печать офсетная. Цена свободная.

Распространяется по подписке.

Отпечатано в типографии

Издательства МИСИ – МГСУ

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

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

ГЛАВНЫЙ РЕДАКТОР:

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

ЗАМ. ГЛАВНОГО РЕДАКТОРА:

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

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

РЕДАКЦИОННАЯ КОЛЛЕГИЯ:

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

СОДЕРЖАНИЕ

ПРОЦЕССЫ ГОРЕНИЯ, ДЕТОНАЦИИ И ВЗРЫВА

Н.Л. ПОЛЕТАЕВ
Максимальный размер взрывоопасных частиц
аэрозвеси железа

5

БЕЗОПАСНОСТЬ ВЕЩЕСТВ И МАТЕРИАЛОВ

Д.А. КУЗНЕЦОВА, Н.В. ЯШИН, В.В. АВДЕЕВ
Многофакторная количественная оптимизация
огнезащитной эффективности интумесцентных
огнезащитных материалов

11

МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ, ЧИСЛЕННЫЕ МЕТОДЫ И КОМПЛЕКСЫ ПРОГРАММ

Н.В. БАРАНОВСКИЙ, С.А. ГАЛАУТДИНОВА, А.О. МАЛИНИН
Математическое моделирование воздействия фронта лесного
пожара на ограждающие конструкции
деревянного здания в сельском населенном пункте

22

БЕЗОПАСНОСТЬ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ И ОБОРУДОВАНИЯ

Е.В. ШИРЯЕВ, С.А. ШАБУНИН, С.А. ШВЫРКОВ
Оценка пожарной опасности эластичных резервуаров
на основе термогравиметрического анализа

37

БЕЗОПАСНОСТЬ ЗДАНИЙ, СООРУЖЕНИЙ, ОБЪЕКТОВ

В.И. ГОЛОВАНОВ, А.В. ПЕХОТИКОВ,
Д.Н. ПРИСТУПЮК, Г.И. КРЮЧКОВ
Огнестойкость строительных конструкций из стального
проката с повышенными показателями термостойкости

47

Ю.К. МАЛИКОВ, А.А. ТИТАЕВ, В.О. СЕРЕБРЕННИКОВ
Аппроксимационная формула для расчета огнестойкости
незащищенных стальных конструкций

57

БЕЗОПАСНОСТЬ ЖИЗНЕДЕЯТЕЛЬНОСТИ

Д.А. КОРОЛЬЧЕНКО, Н.А. ТЕРЕХ, Д.А. ПРОСТАКИШИН
Анализ корректности требований и методик для испытаний
полиспастов, применяемых в системах индивидуальной
защиты от падения с высоты в строительной отрасли

67

ЭКОНОМИКА И УПРАВЛЕНИЕ ПОЖАРНОЙ И КОМПЛЕКСНОЙ БЕЗОПАСНОСТЬЮ

Е.В. ГВОЗДЕВ
Обоснование по выбору экспертного метода для проведения
оценки состояния системы комплексной безопасности
на производственных предприятиях

87

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

CONTENTS

COMBUSTION, DETONATION AND EXPLOSION PROCESSES

N.L. POLETAEV
Maximum explosive particles size
of iron air suspension

SAFETY OF SUBSTANCES AND MATERIALS

D.A. KUZNETSOVA, N.V. YASHIN, V.V. AVDEEV
Multifactorial quantitative optimization
of fire protection efficiency of intumescent
fire retardant materials

MATHEMATICAL MODELING, NUMERICAL METHODS AND PROGRAM COMPLEXES

N.V. BARANOVSKIY, S.A. GALAUTDINOVA, A.O. MALININ
Mathematical simulation of the impact of forest fire front
on the enclosing structures of wooden building
in rural settlement

SAFETY OF TECHNOLOGICAL PROCESSES AND EQUIPMENT

E.V. SHIRYAEV, S.A. SHABUNIN, S.A. SHVYRKOV
Fire hazard assessment of elastic tanks based
on thermogravimetric analysis

SAFETY OF BUILDINGS, STRUCTURES, OBJECTS

V.I. GOLOVANOV, A.V. PEKHOTIKOV, D.N. PRISTUPYUK,
G.I. KRYUCHKOV
Fire resistance of building structures made of rolled steel
with increased heat resistance indicators

Yu.K. MALIKOV, A.A. TITAEV, V.O. SEREBRENNIKOV
Approximation formula for calculating fire resistance
of unprotected steel structures

LIFE SAFETY

D.A. KOROLCHENKO, N.A. TSERAKH, D.A. PROSTAKISHIN
Analysis of requirements correctness and methods for testing
of block pulley used in systems of individual protection against
falling from height in construction industry

ECONOMICS AND FIRE AND COMPLEX SAFETY CONTROL

E.V. GVOZDEV
Justification for the choice of an expert method for assessing
the state of the integrated safety system at industrial
enterprises

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.



Оптимизация эффективности огнезащитных материалов

Стр. 11



Стр. 37

Оценка пожарной опасности эластичных резервуаров



Огнестойкость строительных конструкций из стального проката

Стр. 47



Стр. 67

Анализ требований и методик для испытаний полиспастов

Стр. 87



Выбор метода для оценки системы безопасности на предприятиях



FOUNDER and PUBLISHER —

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

Address:

26 Yaroslavskoe shosse, Moscow,
129337, Russia

Journal founded in 1992,
issued 6 times per year.

Publication is registered by the Federal
Service for Supervision of Communications,
Information Technology, and Mass Media
of Russia. Registration certificate PI
No. FS 77-79402 on November 2, 2020.
DOI prefix: 10.22227.

EDITORIAL STAFF:

Executive editor **Dyadicheva A.A.**

Editor **Korzukhina L.B.**

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

Corrector **Ermikhina O.V.**

Layout **Aleynikova Y.Z.**

Address of Editorial Staff:

26 Yaroslavskoe shosse, Moscow,
129337, Russia

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

E-mail: info@fire-smi.ru

https://www.fire-smi.ru

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

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

Signed for printing 26.06.2024.
Date of publication 28.06.2024.
Format is 60 × 84 1/8.
Printing is 2000 copies.
Chalk-overlay mat paper.
Offset printing. Free price.
Journal sells subscription.

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

EDITOR-IN-CHIEF:

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

DEPUTY EDITOR-IN-CHIEF:

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

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

EDITORIAL BOARD:

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

ПОЖАРОВЗРЫВОБЕЗОПАСНОСТЬ/FIRE AND EXPLOSION SAFETY. 2024. Т. 33. № 3. С. 5–10
POZHAROVZRYVOBEZOPASNOST/FIRE AND EXPLOSION SAFETY. 2024; 33(3):5-10

НАУЧНАЯ СТАТЬЯ/RESEARCH PAPER

УДК 614.841.4

<https://doi.org/10.22227/0869-7493.2024.33.03.5-10>

Максимальный размер взрывоопасных частиц аэрозвеси железа

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. Рассматриваются известные результаты экспериментального исследования нижнего концентрационного предела распространения пламени (НКПР) по аэрозвесям полидисперсных образцов пыли железа в 1-м³ камере (Clouthier, Taveau, Dastidar et al., 2019) и 20-л камере (Cashdollar, 1994). Анализ этих результатов на качественном уровне, выполненный авторами данных исследований, показал, что максимальный размер d_{cr} частиц железа, определяющих взрывоопасность аэрозвеси железной пыли, принадлежит интервалу от 30 до 75 мкм. Поставлена задача уточнить оценку d_{cr} на основе количественного анализа результатов исследования в 1-м³ камере известным методом (Полетаев, 2014).

Выбор и обработка исходных данных. Для двух полидисперсных образцов железа с различными пределами горения в 1-м³ камере (НКПР₁ = 250 г/м³ для тонкодисперсного образца и НКПР₂ = 1250 ... 1500 г/м³ для грубодисперсного образца) построены непрерывные функции распределения частиц по размерам: $F_1(d)$ и $F_2(d)$ соответственно. Здесь $F(d)$ — массовая доля фракции частиц полидисперсного образца, имеющих размер менее d .

Оценка d_{cr} и обсуждение результата. Следуя процедуре количественного метода оценки d_{cr} , решали уравнение $F_1(d_{cr})/F_2(d_{cr}) = \text{НКПР}_2/\text{НКПР}_1$ в наглядной графической форме. Результат решения: $d_{cr} = 36 \pm 3$ мкм. Полученный количественный результат существенно уточнил известную качественную оценку d_{cr} .

Выводы. Способность полидисперсной аэрозвеси железной пыли распространять пламя (т.е. ее взрывоопасность) определяется содержанием мелкодисперсной фракции «менее d_{cr} », минимальное количество которой должно превышать величину порядка 150 г/м³.

Ключевые слова: порошок железа; мелкая фракция; взрыв пыли; 1-м³ камера; нижний концентрационный предел распространения пламени (НКПР)

Для цитирования: Полетаев Н.Л. Максимальный размер взрывоопасных частиц аэрозвеси железа // Пожаровзрывобезопасность/Fire and Explosion Safety. 2024. Т. 33. № 3. С. 5–10. DOI: 10.22227/0869-7493.2024.33.03.5-10

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

Maximum explosive particles size of iron air suspension

Nikolay L. Poletaev ✉

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

ABSTRACT

Introduction. The well-known results of experimental study of the minimum explosive concentration (MEC) polydisperse iron dust air suspension in a 1-m³ chamber (Clouthier, Taveau, Dastidar et al., 2019) and a 20-L chamber (Cashdollar, 1994) are considered. An analysis of these results at a qualitative level, carried out by the authors of these studies, showed that the maximum size of iron particles d_{cr} responsible for the explosion hazard belongs to the range from 30 microns to 75 microns. The task is to clarify the d_{cr} based on a quantitative analysis of the results of the study in a 1-m³ chamber by the known method (Poletaev, 2014).

Selection and processing of initial data. For two polydisperse iron specimens with different MEC in a 1-m³ chamber (MEC₁ = 250 g/m³ for a fine specimen and MEC₂ = 1,250 ... 1,500 g/m³ for a coarse specimen), continuous particle size distribution functions are constructed: $F_1(d)$ and $F_2(d)$, respectively. Here, $F(d)$ is the mass fraction specimen particles having size less than d .

Estimation of d_{cr} and discussion of the result. Following the procedure of the quantitative d_{cr} estimation method, the equation $F_1(d_{cr})/F_2(d_{cr}) = \text{MEC}_2/\text{MEC}_1$ was solved in a visual graphical form. The result of the solution: $d_{cr} = 36 \pm 3$ microns. The obtained quantitative result significantly clarified the known qualitative assessment of the d_{cr} .

Conclusions. The ability of polydisperse air suspension of iron dust to spread the flame (i.e. its explosiveness) is determined by the content of fine fraction “less than d_{cr} ”. The minimum amount of this fraction should exceed the value of about 150 g/m³.

Keywords: iron powder; fine fraction; dust explosion; 1-m³ chamber; minimum explosive concentration (MEC)

For citation: Poletaev N.L. Maximum explosive particles size of iron air suspension. *Pozharovzryvobezopasnost'/ Fire and Explosion Safety*. 2024; 33(3):5-10. DOI: 10.22227/0869-7493.2024.33.03.5-10 (rus).

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

Введение

Ожидается, что металлическое топливо как пригодный для вторичной переработки носитель энергии ввиду обилия и высокой плотности энергии заменит в будущем ископаемое топливо в экономике с нулевым выбросом углерода [1]. Одним из наиболее перспективных видов металлического топлива считается мелкодисперсное железо, поскольку его оксиды могут быть легко собраны и затем восстановлены с помощью солнечной энергии или энергии ветра [2–4]. Перспективы широкого использования мелкодисперсного железа в энергетической отрасли промышленности с необходимостью сопряжены с опасностью взрывов железной пыли, которые регулярно возникают в различных странах, принося как материальные убытки, так и людские потери¹.

Профилактика взрывов железной пыли основывается на результатах разнообразных исследований горючести дисперсного железа, которым посвящено немало научных работ. Например, проводились исследования горения как отдельных частиц железа [5–7], так и аэрозвесей железной пыли, включая ламинарное горение [8], турбулентное горение в маломасштабной 20-л камере [9–14] и крупномасштабной 1-м³ камере [11, 15, 16], температуру самовоспламенения [17].

В то же время ряд характеристик взрывоопасности железной пыли остается недостаточно изученным. Это, в частности, касается предельного размера частиц железа d_{cr} , способных образовать взрывоопасную взвесь в воздухе нормального состава. Результаты исследований нижнего концентрационного предела распространения пламени (НКПР) по аэрозвесей железной пыли предлагают весьма широкий интервал размеров, к которому принадлежит упомянутый параметр: 30 мкм $\leq d_{cr} \leq 75$ мкм. Нижняя граница интервала обусловлена независимостью НКПР железной пыли от дисперсного состава при размере частиц менее 30 мкм [9]. Верхняя граница интервала обусловлена взрывобезопасностью железной пыли при размере частиц более 75 мкм [16].

¹ CSB. CSB Continues Investigation of Fatal Fire at Hoeganaes Corporation Located Outside of Nashville, Tennessee, 2011. URL: <https://www.csb.gov/csb-continuesinvestigation-of-fatal-fire-at-hoeganaes-corporation-located-outside-of-nashville-tennessee/>

В настоящей работе поставлена задача уточнить оценку d_{cr} на основе анализа полученных в [16] результатов с помощью метода расчета d_{cr} , предложенного в работе [18].

Выбор экспериментальных данных

Применение метода [18] для оценки d_{cr} предполагает наличие нескольких (по крайней мере двух) полидисперсных образцов исследуемой пыли, для каждого из которых известны НКПР и распределение частиц по размерам $F(d)$. Под $F(d)$ понимается массовая доля частиц дисперсного образца, имеющих размер менее d . Последнее, в частности, предполагает, что форма отдельной частицы образца позволяет с приемлемой точностью характеризовать эту частицу единственным (габаритным) размером. Для оценки d_{cr} предпочтительно использовать значения НКПР, полученные при тестировании образцов пыли в крупномасштабной камере, и иметь существенное отличие значений НКПР и/или $F(d)$ для различных образцов.

Для настоящего исследования выбраны два образца железной пыли, исследованной в 1-м³ камере Fike Corporation, USA [16].

НКПР выбранных образцов можно оценить по графикам зависимости избыточного давления взрыва от концентрации аэрозвесей в 1-м³ камере, приведенным на рис. 1. В качестве критерия взрыва аэрозвесей в камере полагаем скачок давления в 1 бар

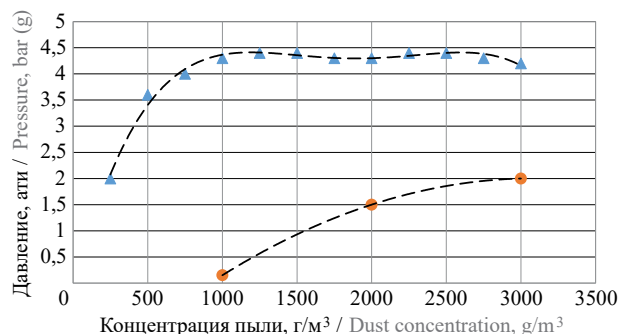


Рис. 1. Зависимость избыточного давления взрыва тонкодисперсного (▲) и грубодисперсного (●) образцов железной пыли от концентрации пыли в воздухе [16]; 1 бар = 10⁵ кПа
Fig. 1. Dependence of explosion overpressure of fine (▲) and coarse (●) iron dust specimens on the dust concentration in the air [16]; 1 bar = 10⁵ kPa

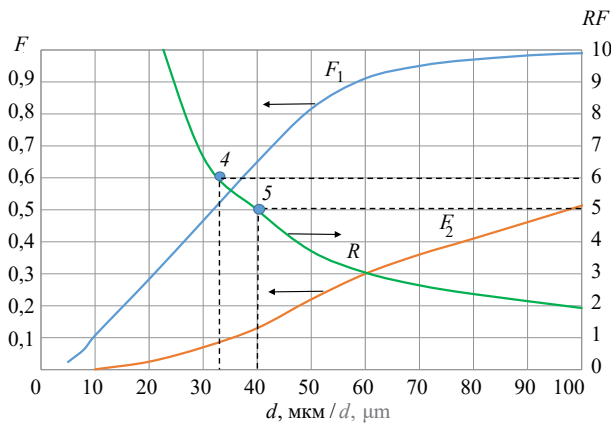


Рис. 2. Зависимости массовой доли F фракции частиц «менее d_{cr} » от размера d для тонкодисперсного (F_1) и грубодисперсного (F_2) образцов железа [16] и их отношение $RF = F_1/F_2$. Жирная точка 4 имеет координаты $d = 33$ мкм, $RF = 6$. Жирная точка 5 имеет координаты $d = 39$ мкм, $RF = 5$

Fig. 2. Dependences of the mass fraction F of the particle fraction «less than d_{cr} » on the size d for fine (F_1) and coarse (F_2) iron specimens [16] and their ratio $RF = F_1/F_2$. Bold point 4 has coordinates $d = 33$ microns, $RF = 6$. Bold point 5 has coordinates $d = 39$ microns, $RF = 5$

(100 кПа) в соответствии с нормами США². Отсюда следует существенное различие бедных пределов для выбранных образцов: $\text{НКПР}_1 \approx 250 \text{ г/м}^3$; $\text{НКПР}_2 = 1250 \dots 1500 \text{ г/м}^3$. Разброс последнего значения вызван скудностью экспериментальных данных. Здесь и далее нижние индексы «1» и «2» относятся к тонкодисперсному и грубодисперсному образцу соответственно.

Функции распределения частиц выбранных образцов по размерам F_1 и F_2 также существенно различаются, что видно из графиков, приведенных на рис. 2. Анализ частиц с использованием электронного микроскопа показал, что форма частиц удовлетворительно аппроксимируется сферой.

Оценка d_{cr}

Согласно методике [18], оценка d_{cr} основана на трех эмпирических правилах (П) горения взвешенной в воздухе пыли однородного твердого горючего вещества конкретного химического состава.

П1: существует размер d_{cr} , разделяющий монодисперсные аэрозвеси на взрывоопасные (с размером частиц менее d_{cr}) и невзрывоопасные (с размером частиц более d_{cr}).

П2: НКПР взрывоопасной монодисперсной аэрозвеси не зависит от размера частиц и далее будет обозначаться символами НКПР₀.

П3: для аэрозвеси полидисперсной пыли НКПР = $\text{НКПР}_0/\eta_{cr}$, где η_{cr} — массовая доля фракции «менее d_{cr} », т.е. $\eta_{cr} = F(d_{cr})$.

² ASTM E1515–14. Standard Test Method for Minimum Explosible Concentration of Combustible Dusts. 2014.

Следуя правилу П3, находят d_{cr} для железа путем геометрически наглядного решения уравнения:

$$F_1(d_{cr})/F_2(d_{cr}) = \text{НКПР}_2/\text{НКПР}_1 = 5 \dots 6.$$

Согласно представленной на рис. 2 графической информации, имеем для пыли железа $d_{cr} = 36 \pm 3$ мкм, откуда, в частности, следует оценка $\text{НКПР}_0 \approx 150 \text{ г/м}^3$.

Обсуждение результата

Полученная в данной работе оценка d_{cr} для пыли железа ($d_{cr} = 36 \pm 3$ мкм) по методу из [18] не противоречит известным качественным характеристикам данного параметра: $30 \text{ мкм} \leq d_{cr} \leq 75 \text{ мкм}$ [9, 16]. Одновременно следует заметить, что объективность выполненной оценки зависит от надежности использованных исходных данных о дисперсности и горючести образцов железной пыли, которая требует дополнительного обсуждения.

Известной причиной неконтролируемого изменения дисперсности пыли является процедура распыления исходного дисперсного материала во взрывных камерах, которая для некоторых видов материалов приводит к измельчению частиц [19, 20]. Поскольку частицы железа не относятся к хрупким материалам, разумно предполагать отсутствие такого эффекта в экспериментах [16] и считать дисперсность железной пыли неизменной.

Надежность использованных в настоящей работе значений НКПР для образцов железной пыли можно формально подтвердить надежностью метода получения этих значений во взрывной камере объемом 1 м^3 по стандарту EN 14034³. Известно [21, 22], что тестирование пыли в 1-м^3 камере дает наибольшую (включая сравнение с 20-л камерой) уверенность в наличии взрывоопасности у исследуемого образца пыли, особенно в тех случаях, когда образец близок к границе между взрывоопасными и взрывобезопасными дисперсными материалами.

Тем не менее сомнение в надежности использованных значений НКПР из [16] все же имеется. Поводом для сомнения является заметное отличие максимального давления взрыва мелкодисперсного образца $P_{1 \text{ max}} = 4,4 \text{ бар}$ (см. рис. 1) от величины $6,5 \text{ бар}$, полученной в 1-м^3 камере другими исследователями для образца железной пыли похожего дисперсного состава [15]. Возможно предположить, что это отличие вызвано использованием разных распылителей: «Semicircular spray pipe» в [15] и «Rebound nozzle» в [16]. Первый распылитель является оригинальным (соответствует ISO 6184-1⁴) и обеспечивает равномерное распыление железной

³ EN 14034-1:2004+A1:2011. Determination of explosion characteristics of dust clouds.

⁴ ISO 6184-1:1985 (en). Explosion protection systems — Part 1: Determination of explosion indices of combustible dusts in air.

пыли по объему камеры, поскольку параметр $P_{\max}$ в [15] близок к своему адиабатическому значению 6,55 бар [9].

В то же время следует отметить, что для оценки d_{cr} используется не абсолютное значение НКПР, а отношение пределов разных полидисперсных пылей. Поэтому для получения искомого результата достаточно иметь пространственное подобие распределения пыли по объему взрывной камеры при различных среднеобъемных концентрациях дисперсного материала, которое, скорее всего, в опытах [16] присутствует.

Выводы

Рассмотрена известная качественная оценка максимального размера взрывоопасных частиц d_{cr} аэрозвесей железа (более 30 мкм, но менее 75 мкм), полученная на основе результатов тестиро-

вания взрывоопасности различных полидисперсных пылей железа в камерах объемом 20 л и 1 м³.

Данная оценка уточнена на основе разработанного автором количественного метода, в котором используются сведения о нижнем концентрационном пределе распространения пламени для двух существенно различных полидисперсных образцов в 1-м³ камере. Уточненное значение критического параметра для железной пыли составило 36 ± 3 мкм.

Согласно идеологии построения оценки d_{cr} , способность полидисперсной аэрозвесей железной пыли распространять пламя определяется содержанием фракции «менее d_{cr} », которое должно превышать величину порядка 150 г/м³. Горение частиц большего размера возникает при наличии остатков кислорода в продуктах горения указанной мелкой фракции.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Bergthorson J.M. Recyclable metal fuels for clean and compact zero-carbon power // Progress in Energy and Combustion Science. 2018. No. 68. Pp. 169–196. DOI: 10.1016/j.pecs.2018.05.001
2. Bergthorson J.M., Goroshin S., Soo M.J., Julien P., Palecka J., Frost D.L. et al. Direct combustion of recyclable metal fuels for zero-carbon heat and power // Applied Energy. 2015. No. 160. Pp. 368–382. DOI: 10.1016/j.apenergy.2015.09.037
3. Wiinikka H., Vikström T., Wennebro J., Toth P., Sepman A. Pulverized sponge iron, a zero carbon and clean substitute for fossil coal in energy applications // Energy & Fuels. 2018. No. 32 (9). DOI: 10.1021/acs.energyfuels.8b02270
4. Tóth P., Ögren Y., Sepman A., Gren P., Wiinikka H. Combustion behavior of pulverized sponge iron as a recyclable electrofuel // Powder Technology. 2020. No. 373. Pp. 210–219. DOI: 10.1016/j.powtec.2020.05.078
5. Sun J.-H., Dobashi R., Hirano T. Combustion behavior of iron particles suspended in air // Combustion Science and Technology. 2000. No. 150 (1). Pp. 99–114. DOI: 10.1080/00102200008952119
6. Ning D., Shoshin Y., van Oijen J.A., Finotello G., de Goey L.P.H. Burn time and combustion regime of laser-ignited single iron particle // Combust Flame. 2021. No. 230. P. 111424. DOI: 10.1016/j.combustflame.2021.111424
7. Ning D., Shoshin Y., van Stiphout M., van Oijen J., Finotello G., de Goey P. Temperature and phase transitions of laser-ignited single iron particle // Combust Flame. 2022. No. 236. P. 111801. DOI: 10.1016/j.combustflame.2021.111801
8. Tang F.-D., Goroshin S., Higgins A.J. Modes of particle combustion in iron dust flames // Proceedings of the Combustion Institute. 2011. No. 33 (2). Pp. 1975–1982. DOI: 10.1016/j.proci.2010.06.088
9. Cashdollar K.L. Flammability of metals and other elemental dust clouds // Process Safety Progress. 1994. No. 13 (3). Pp. 139–145. DOI: 10.1002/prs.680130306
10. Cashdollar K.L. Overview of dust explosibility characteristics // Journal of Loss Prevention in the Process Industries. 2000. No. 13 (3–5). Pp. 183–199. DOI: 10.1016/S0950-4230(99)00039-X
11. Going J.E., Chatrathi K., Cashdollar K.L. Flammability limit measurements for dusts in 20-l and 1-m³ vessels // Journal of Loss Prevention in the Process Industries. 2000. No. 13. Pp. 209–219. DOI: 10.1016/S0950-4230(99)00043-1
12. Taveau J.R., Going J.E., Hochgreb S., Lemkowitz S.M., Roekaerts D.J.E.M. Igniter-induced hybrids in the 20-l sphere // Journal of Loss Prevention in the Process Industries. 2017. No. 49. Pp. 348–356. DOI: 10.1016/j.jlp.2017.07.014
13. Danzi E., Pio G., Marmo L., Salzano E. The explosion of non-nano iron dust suspension in the 20-l spherical bomb // Journal of Loss Prevention in the Process Industries. 2021. No. 71. P. 104447. DOI: 10.1016/j.jlp.2021.104447
14. Guo Y., Ren K., Wei A., Tao C., Huang W., Zhao P. et al. Iron dust explosion characteristics with small amount of nano-sized Fe₂O₃ and Fe₃O₄ particles // Manuscript FUEL. 2022. P. 124786. DOI: 10.1016/j.fuel.2022.124786
15. Scholl E.W., Reeh D., Wiemann W. et al. Brenn- und Explosions — Kenngrößen von Stäuben // SFT-Report. 1979. No. 2.2. 100 p. URL: <http://staubex.ifa.dguv.de/explosuche.aspx>

16. Clouthier M.P., Taveau J.R., Dastidar A.G., Morrison L.S., Zalosh R.G., Ripley R.C. et al. Iron and aluminum powder explosibility in 20-L and 1-m³ chambers // *Journal of Loss Prevention in the Process Industries*. 2019. No. 62. P. 103927. DOI: 10.1016/j.jlp.2019.103927
17. Mi X., Fujinawa A., Bergthorson J.M. A quantitative analysis of the ignition characteristics of fine iron particles // *Combust Flame*. 2022. No. 240. P. 112011. DOI: 10.1016/j.combustflame.2022.112011
18. Полетаев Н.Л. Расчетно-экспериментальная оценка максимального размера частиц взрывоопасной монодисперсной аэрозвеси // *Пожаровзрывобезопасность/Fire and explosion safety*. 2014. Т. 23. № 9. С. 15–26. DOI: 10.18322/PVB.2014.23.09.15-26
19. Kalejaiye O., Amyotte P.R., Pegg M.J., Cashdollar K.L. Effectiveness of dust dispersion in the 20-L Siwek chamber // *Journal of Loss Prevention in the Process Industries*. 2010. No. 23 (1). Pp. 46–59. DOI: 10.1016/j.jlp.2009.05.008
20. Altwal J.M., Véhot L.N. Experimental study of the influence of particle size on Minimum Explosible Concentration of sulfur dust // *Journal of Loss Prevention in the Process Industries*. 2021. No. 71. P. 104507. DOI: 10.1016/j.jlp.2021.104507
21. Proust Ch., Accorsi A., Dupont L. Measuring the violence of dust explosions with the “20-l sphere” and with the standard “ISO 1 m³ vessel”. Systematic comparison and analysis of the discrepancies // *Journal of Loss Prevention in the Process Industries*. 2007. No. 20. Pp. 599–606. DOI: 10.1016/j.jlp.2007.04.032
22. Полетаев Н.Л. О проблеме экспериментального обоснования низкой взрывоопасности горючей пыли в 20-л камере // *Пожаровзрывобезопасность/Fire and explosion safety*. 2017. Т. 26. № 6. С. 5–20. DOI: 10.18322/PVB.2017.26.06.5-20

REFERENCES

1. Bergthorson J.M. Recyclable metal fuels for clean and compact zero-carbon power. *Progress in Energy and Combustion Science*. 2018; 68:169-196. DOI: 10.1016/j.pecs.2018.05.001
2. Bergthorson J.M., Goroshin S., Soo M.J., Julien P., Palecka J., Frost D.L. et al. Direct combustion of recyclable metal fuels for zero-carbon heat and power. *Applied Energy*. 2015; 160:368-382. DOI: 10.1016/j.apenergy.2015.09.037
3. Wiinikka H., Vikström T., Wennebro J., Toth P., Sepman A. Pulverized Sponge Iron, a Zero Carbon and Clean Substitute for Fossil Coal in Energy Applications. *Energy & Fuels*. 2018; 32(9). DOI: 10.1021/acs.energyfuels.8b02270
4. Tóth P., Ögren Y., Sepman A., Gren P., Wiinikka H. Combustion behavior of pulverized sponge iron as a recyclable electrofuel. *Powder Technology*. 2020; 373:210-219. DOI: 10.1016/j.powtec.2020.05.078
5. Sun J.-H., Dobashi R., Hirano T. Combustion behavior of iron particles suspended in air. *Combustion Science and Technology*. 2000; 150(1):99-114. DOI: 10.1080/00102200008952119
6. Ning D., Shoshin Y., van Oijen J.A., Finotello G., de Goey L.P. H. Burn time and combustion regime of laser-ignited single iron particle. *Combust Flame*. 2021; 230:111424. DOI: 10.1016/j.combustflame.2021.111424
7. Ning D., Shoshin Y., van Stiphout M., van Oijen J., Finotello G., de Goey P. Temperature and phase transitions of laser-ignited single iron particle. *Combust Flame*. 2022; 236:111801. DOI: 10.1016/j.combustflame.2021.111801
8. Tang F.-D., Goroshin S., Higgins A.J. Modes of particle combustion in iron dust flames. *Proceedings of the Combustion Institute*. 2011; 33(2):1975-1982. DOI: 10.1016/j.proci.2010.06.088
9. Cashdollar K.L. Flammability of metals and other elemental dust clouds. *Process Safety Progress*. 1994; 13(3):139-145. DOI: 10.1002/prs.680130306
10. Cashdollar K.L. Overview of dust explosibility characteristics. *Journal of Loss Prevention in the Process Industries*. 2000; 13(3-5):183-199. DOI: 10.1016/S0950-4230(99)00039-X
11. Going J.E., Chatrathi K., Cashdollar K.L. Flammability limit measurements for dusts in 20-l and 1-m³ vessels. *Journal of Loss Prevention in the Process Industries*. 2000; 13:209-219. DOI: 10.1016/S0950-4230(99)00043-1
12. Taveau J.R., Going J.E., Hochgreb S., Lemkowitz S.M., Roekaerts D.J.E.M. Igniter-induced hybrids in the 20-l sphere. *Journal of Loss Prevention in the Process Industries*. 2017; 49:348-356. DOI: 10.1016/j.jlp.2017.07.014
13. Danzi E., Pio G., Marmo L., Salzano E. The explosion of non-nano iron dust suspension in the 20-l spherical bomb. *Journal of Loss Prevention in the Process Industries*. 2021; 71:104447. DOI: 10.1016/j.jlp.2021.104447
14. Guo Y., Ren K., Wei A., Tao C., Huang W., Zhao P. et al. Iron dust explosion characteristics with small amount of nano-sized Fe₂O₃ and Fe₃O₄ particles. *Manuscript FUEL*. 2022; 124786. DOI: 10.1016/j.fuel.2022.124786
15. Scholl E.W., Reeh D., Wiemann W. et al. Brenn-und Explosions — Kenngrößen von Stauben. *SFT-Report*. 1979; 2.2:100. URL: <http://staubex.ifa.dguv.de/explosuche.aspx>
16. Clouthier M.P., Taveau J.R., Dastidar A.G., Morrison L.S., Zalosh R.G., Ripley R.C. et al. Iron and aluminum powder explosibility in 20-L and 1-m³ chambers. *Journal of Loss Prevention in the Process Industries*. 2019; 62:103927. DOI: 10.1016/j.jlp.2019.103927
17. Mi X., Fujinawa A., Bergthorson J.M. A quantitative analysis of the ignition characteristics of fine iron particles. *Combust Flame*. 2022; 240:112011. DOI: 10.1016/j.combustflame.2022.112011

18. Poletaev N.L. Experiment-calculated estimating of the maximum particle size of explosive monodisperse dust-air mixture. *Pozharovzryvbezopasnost/Fire and Explosion Safety*. 2014; 23(9):15-26. DOI: 10.18322/PVB.2014.23.09.15-26 (rus).
19. Kalejaiye O., Amyotte P.R., Pegg M.J., Cashdollar K.L. Effectiveness of dust dispersion in the 20-L Siwek chamber. *Journal of Loss Prevention in the Process Industries*. 2010; 23(1):46-59. DOI: 10.1016/j.jlp.2009.05.008
20. Altwal J.M., Véhot L.N. Experimental study of the influence of particle size on Minimum Explosible Concentration of sulfur dust. *Journal of Loss Prevention in the Process Industries*. 2021; 71:104507. DOI: 10.1016/j.jlp.2021.104507
21. Proust Ch., Accorsi A., Dupont L. Measuring the violence of dust explosions with the “209-l sphere” and with the standard “ISO 1 m³ vessel”. Systematic comparison and analysis of the discrepancies. *Journal of Loss Prevention in the Process Industries*. 2007; 20:599-606. DOI: 10.1016/j.jlp.2007.04.032
22. Poletaev N.L. On the problem of experimental justification of low explosibility for dust/air mixture in the 20-l chamber. *Pozharovzryvbezopasnost/Fire and Explosion Safety*. 2017; 26(6):5-20. DOI: 10.18322/PVB.2017.26.06.5-20 (rus).

*Поступила 12.02.2024, после доработки 22.02.2024;
принята к публикации 06.03.2024*

*Received February 12, 2024; Received in revised form February 22, 2024;
Accepted March 6, 2024*

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. 2024. Т. 33. № 3. С. 11–21
POZHAROVZRYVOBEZOPASNOST/FIRE AND EXPLOSION SAFETY. 2024; 33(3):11-21

НАУЧНАЯ СТАТЬЯ/RESEARCH PAPER

УДК 699.812

<https://doi.org/10.22227/0869-7493.2024.33.03.11-21>

Многофакторная количественная оптимизация огнезащитной эффективности интумесцентных огнезащитных материалов

Дарья Алексеевна Кузнецова, Николай Владимирович Яшин ✉, Виктор Васильевич Авдеев

Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова, химический факультет, г. Москва, Россия

АННОТАЦИЯ

Введение. В качестве средств пассивной огнезащиты широко применяются интумесцентные огнезащитные материалы (ИОМ). Принцип их действия, обеспечивающий повышение огнестойкости конструкции, основан на вспенивании и образовании в условиях огневого воздействия теплоизоляционного пенококсового слоя. Активные исследования, проводимые в данной области, сформулировали общие принципы для формирования ИОМ на основе функциональных компонентов (ФК), отвечающих за огнезащитную функцию покрытий. **Цель.** Предложить новый системный подход к разработке ИОМ, который позволит учесть количественное влияние всех ФК, входящих в состав ИОМ, и продемонстрировать его эффективность на примере разработки рецептуры водоосновного ИОМ.

Методология. Разработан и описан метод многофакторной количественной оптимизации для повышения огнезащитной эффективности (ОЭ) ИОМ. Оптимизация состава ведется по изменению количественного соотношения входящих в рецептуру ИОМ ФК на выбранный коэффициент варьирования. Оптимизация осуществляется по итерационному механизму, позволяющему обнаруживать новые максимумы ОЭ. Каждому этапу соответствует матрица плана, описывающая все возможные комбинации факторов, число которых определяется числом ФК. Для оценки ОЭ и степени завершенности оптимизации проводили огневые испытания в условиях стандартного температурного режима пожара. Метод апробирован на базовой рецептуре ИОМ на основе поливинилацетатной дисперсии и четырех ФК: полифосфата аммония, меламина, пентаэритрита и диоксида титана.

Результаты и их обсуждение. За два этапа многофакторной количественной оптимизации исследуемая рецептура исследуемого ИОМ достигла своего оптимума по показателю ОЭ. Удалось повысить ОЭ ИОМ с 31 до 45 мин, отмечены качественные улучшения внешнего вида пенококсов.

Выводы. Многофакторный метод оптимизации позволил найти оптимальное соотношение ФК и увеличить ОЭ на 45 % в результате хорошо алгоритмизированных экспериментальных действий. Данный метод оптимизации можно рекомендовать для внедрения в процесс разработки новых ИОМ.

Ключевые слова: интумесцентные покрытия; пенококсы; степень расширения; полифосфат аммония; антипирены

Благодарности. Работа выполнена в рамках проектов (договоров): AAAA-A21-121011590086-0 и №202/23 от 01.02.23

Для цитирования: Кузнецова Д.А., Яшин Н.В., Авдеев В.В. Многофакторная количественная оптимизация огнезащитной эффективности интумесцентных огнезащитных материалов // Пожаровзрывобезопасность/ Fire and Explosion Safety. 2024. Т. 33. № 3. С. 11–21. DOI: 10.22227/0869-7493.2024.33.03.11-21

✉ Яшин Николай Владимирович, e-mail: yashin-n@yandex.ru

Multifactorial quantitative optimization of fire protection efficiency of intumescent fire retardant materials

Daria A. Kuznetsova, Nikolay V. Yashin ✉, Victor V. Avdeev

M.V. Lomonosov Moscow State University, Department of Chemistry, Moscow, Russian Federation

ABSTRACT

Introduction. Intumescent fire retardant materials (IFRM) are widely used as passive fire protection means. The principle of their action providing increase of fire resistance of a structure is based on foaming and formation of heat-insulating coked cellular material layer under conditions of fire exposure. Active research conducted in this field formulated general principles for the development of IFRM based on functional components (FC) responsible for the fire protection function of coverings.

Purpose. To propose a new systematic approach to the development of IFRM, which takes into account the quantitative influence of all FC included in the composition of IFRM and to demonstrate its effectiveness on the example of developing the formulation of water-base IFRM.

Methodology. A method of multifactor quantitative optimization was developed and described to enhance the fire retardant effectiveness (FRE) of IFRM. The optimization of the composition is carried out by changing the quantitative ratio of the FC within the IFRM formulation by a selected coefficient of variation. The optimization is carried out through an iterative mechanism, which allows to detect new maximums of FRE. Each stage corresponds to a design matrix describing all possible combinations of FC, the number of which is determined by the number of FC. To assess the maximum FRE and the progress of optimization, fire tests were conducted under standard fire temperature conditions. The method was validated on a base IFRM formulation based on polyvinyl acetate dispersion and four FC: ammonium polyphosphate, melamine, pentaerythritol, and titanium dioxide.

Results and its discussion. Through two stages of multifactor quantitative optimization, the investigated formulation of the IFRM achieved its optimum in terms of FRE. The FRE of the IFPM was increased from 31 to 45 minutes, accompanied by qualitative improvements in the appearance of the coked cellular material.

Conclusions. The multifactor optimization method allowed to find the optimal ratio of the FC and to increase the FRE by 45 % as a result of well-structured experimental procedures. This optimization method is recommended for implementation in the development process of new IFRM.

Keywords: intumescent coverings; coked cellular material; degree of expansion; ammonium polyphosphate; flame retardants

Acknowledgments. The work was carried out within the framework of projects (contracts): AAAAA-A21-121011590086-0 and No.202/23 dated 02.01.2013

For citation: Kuznetsova D.A., Yashin N.V., Avdeev V.V. Multifactorial quantitative optimization of fire protection efficiency of intumescent fire retardant materials. *Pozharovzryvobezopasnost/Fire and Explosion Safety*. 2024; 33(3):11-21. DOI: 10.22227/0869-7493.2024.33.03.11-21 (rus).

✉ Nikolay Vladimirovich Yashin, e-mail: yashin-n@yandex.ru

Введение

Наличие во многих странах законодательно закрепленных требований в области пожарной безопасности приводит к необходимости использования в строительной отрасли материалов специального назначения, обеспечивающих требуемые нормативы по огнестойкости для конструкций и коммуникаций объектов строительства. Среди таких материалов большой интерес благодаря своим технологическим и декоративным свойствам представляют интумесцентные (терморасширяющиеся) огнезащитные материалы (ИОМ) [1].

Принцип их действия основан на вспенивании покрытия в условиях огневого воздействия и образовании из входящих в состав специально подобранных функциональных компонентов (ФК) теплоизоляционного пенококсового слоя, выполняющего функцию барьера между огнем и защищаемой поверхностью, что позволяет конструкциям сохранять свою несущую способность в условиях огневого воздействия в течение длительного времени.

В настоящее время разработаны общие принципы создания вспучивающихся композиций и обеспечения их устойчивости к тепловым воздействиям [2, 3].

Известно, что огнезащитные свойства ИОМ в главной степени зависят от количества и соотношения входящих в их состав антипиренов, ответственных за формирование в условиях термического воздействия пенококсового слоя и сохранение его теплофизических параметров при продолжительном термическом воздействии [4, 5]. Поэтому большая часть

работ в области разработки ИОМ посвящена изучению влияния данных ФК на огнезащитную эффективность (ОЭ) терморасширяющейся композиции [6, 7], их синергетического действия в системах с различными полимерными связующими [8–10], а также определению их оптимальных количественных соотношений [11, 12]. Опыт исследований, проводимых в данном направлении, показывает, что количественное соотношение антипиренов не является фиксированным и зависит от компонентного состава ИОМ: вида полимерного связующего и химической природы ФК [13–16]. Следовательно, в разных огнезащитных системах, с разным компонентным составом, максимальное значение ОЭ может достигаться при различном количественном распределении антипиренов.

В работах [17–21], посвященных поиску новых ФК, количественное соотношение антипиренов в ИОМ выбирается исходя из уже имеющихся данных по созданию подобных рецептур. В большинстве исследований оптимизация состава если и проводится, то только по содержанию одного или, реже, нескольких антипиренов, присутствующих в составе. Как правило, в этих работах отсутствует системный подход к оптимизации количественного состава композиций, варьирование состава по каждому компоненту проводится независимо, что зачастую не позволяет достигнуть наиболее высоких показателей ОЭ огнезащитного материала. Использование такого эмпирического подхода на стадии формирования ингредиентного состава ИОМ осложняет процесс разработки эффективных ИОМ и внедрение

в их рецептуру новых антипиренов. Эмпирический подход к изучению огнезащитных свойств многокомпонентных систем по мере роста числа компонентов часто становится невозможным из-за объема работ, которые требуется выполнить в ходе раздельной последовательной оптимизации количественного содержания каждого отдельного ФК. Значимым фактором при этом становится субъективный выбор исследователя в пользу тех или иных рецептурных вариаций вместо методически обоснованных действий при поиске лучших композиций.

Также было показано [22–24], что применение различных марок одного и того же ФК в рецептуре ИОМ может оказывать значительное влияние на ОЭ и другие теплофизические свойства системы. В таких условиях существует потребность в создании нового системного подхода к разработке рецептур ИОМ, который позволит за сравнительно небольшое число итераций определить влияние количественного содержания всех отвечающих за огнезащитную функцию компонентов и даст возможность раскрыть полный огнезащитный потенциал получаемых материалов. Решению этой проблемы и посвящена настоящая статья.

Методология

Многофакторный эксперимент по оптимизации рецептур ИОМ

Компоненты, входящие в рецептуру ИОМ, можно разделить на ФК, количественное содержание которых имеет основное определяющее значение на ОЭ исследуемого ИОМ, полимерное связующее и аддитивы. Аддитивы — компоненты, количественное содержание которых определяет малярно-технические и технологические, а также эксплуатационные свойства огнезащитного лакокрасочного материала, но не оказывает существенного влияния на огнезащитные свойства ИОМ.

В качестве методического подхода повышения ОЭ разрабатываемых ИОМ в данной работе авторами предложен метод многофакторной количественной оптимизации ключевых компонентов огнезащитных композиций, основанный на проведении полного факторного эксперимента и позволяющий существенно сократить сроки разработки огнезащитных лакокрасочных материалов и сделать ее точно планируемым мероприятием.

Оптимизация состава ведется по изменению количественного соотношения факторов k , в роли которых выступают массовые доли ключевых ФК, входящих в рецептуру исследуемой ИОМ, на выбранный коэффициент варьирования.

Коэффициент варьирования (шаг оптимизации) h выбирается исходя из ограничения:

$$h > \frac{\delta}{\omega}, \quad (1)$$

где δ — относительная погрешность взвешивания исходных компонентов;

ω — массовая доля ФК в рецептуре ИОМ.

Количество опытов N , проводимых на каждом этапе оптимизации, задается формулой:

$$N = 2^k - 1, \quad (2)$$

где k — количество одновременно учитываемых факторов, которое в настоящей работе определяется числом ФК.

Под опытом в данном случае понимается образец исследуемой ИОМ с измененным соотношением ФК соответственно матрице плана. Каждому образцу (комбинации факторов) в данной матрице отвечает точка в многомерном пространстве, которая удалена на некоторый вектор от некой базовой исследуемой рецептуры ИОМ, называемой *центром плана* и подлежащей оптимизации.

При этом массовые доли компонентов, не участвующих в оптимизации, а также набор (количество) ФК в рецептуре ИОМ остаются постоянными.

Для каждого фактора возможны два уровня l :

1) если количество данного компонента в исследуемом составе остается неизменным, то в матрице плана эксперимента кодированным значением фактора выступает $l = 0$;

2) если в опыте производится добавка компонента, то значению фактора в матрице отвечает $l = 1$.

Изменение соотношения ФК при постоянстве общего процентного содержания ФК, а также остальных, неключевых, компонентов в рецептуре ИОМ достигается путем добавления расчетного количества монокомпонентных паст (МП) к центру плана. МП содержит только один ФК в количестве, равном общему количеству ФК в исходной рецептуре. Такой подход позволяет снизить трудоемкость выполняемых работ по оптимизации.

Расчет массы МП, добавляемой к навеске исходного состава, осуществляется по формуле:

$$m = m_0 \omega h l, \quad (3)$$

где m_0 — масса навески исходного состава;

ω — массовая доля ФК монокомпонентной пасты в исходном составе;

l — кодированное значение фактора.

Соотношение ФК $\omega_{\text{фк}}$ в полученных образцах рассчитывается по формуле:

$$\omega_{\text{фк}} = \frac{m_{\text{нав}} \omega + m_{\text{доб}}}{m_{\text{нав}} + m_{\text{доб}}}, \quad (4)$$

где $m_{\text{нав}}$ — масса навески исходного состава, принятая равной 200 г;

$m_{\text{доб}}$ — масса добавочного количества МП.

Процесс оптимизации осуществляется по итерационному механизму. Последующие этапы оптимизации проводятся либо вокруг нового центра плана, либо вокруг старого, но уже с меньшим шагом. Выбор того или иного варианта действия, а также принятие решения о целесообразности проведения дальнейшей оптимизации осуществляется на основе анализа данных, полученных в ходе эксперимента.

Методика проведения эксперимента по определению ОЭ

Все полученные образцы проходят огневые испытания для оценки их ОЭ. В качестве объекта огнезащиты в настоящей работе были выбраны стальные конструкции.

Огневые испытания проводились на лабораторном стенде, моделирующем стандартный (целлюлозный) режим пожара в результате горения жидкого топлива (керосин) в соответствии с ГОСТ 30247.0–94¹.

Образцы ИОМ наносились на предварительно загрунтованные стальные пластины $150 \times 150 \times 5$ мм общей толщиной сухого покрытия в 1 мм и выдерживались в течение 7 суток при комнатной температуре.

В ходе испытания контролировалась температура внутри лабораторного стенда и на необогреваемой стороне образцов. Фиксировалось время от начала стандартизированного теплового воздействия на испытуемое огнезащитное покрытие до момента достижения стальной подложкой, защищаемой исследуемым огнезащитным составом, критической температуры металла в 500°C . Это время является характеристикой значения огнезащитной эффективности испытуемого материала.

Для определения точности огневого эксперимента была проведена серия испытаний для образцов, изготовленных по одной рецептуре, и рассчитано среднеквадратическое отклонение S полученных значений их ОЭ:

$$S = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2}{n-1}}, \quad (5)$$

где x_i — результат эксперимента;

$\bar{x}$ — среднее арифметическое значение результатов;

n — количество измерений.

Далее рассчитывался критерий репрезентативности выборки (среднеквадратичная погрешность среднего арифметического) $S(\bar{x})$:

$$S(\bar{x}) = \frac{s}{\sqrt{n}}. \quad (6)$$

Предполагая, что ошибка эксперимента подчиняется закону нормального распределения, опреде-

ляли доверительный интервал $\pm\Delta$ при помощи критерия Стьюдента $t_{w,n}$:

$$\pm\Delta = t_{w,n} \cdot S(\bar{x}). \quad (7)$$

Относительная погрешность эксперимента ε рассчитывалась по формуле:

$$\varepsilon = \frac{|\Delta|}{\bar{x}} \cdot 100. \quad (8)$$

Итеративная процедура многофакторного эксперимента

После прохождения огневых испытаний проводился анализ полученных данных ОЭ образцов первого этапа оптимизации.

При анализе полученных данных на каждой итерации возможны два сценария:

- выявлен новый максимум ОЭ;
- все испытанные образцы показали меньшую ОЭ по сравнению с центром плана данного этапа.

В первом случае проводится оценка значимости полученных данных. Для этого необходимо выполнение следующего условия:

$$\varepsilon\tau_{\text{крит}}^{\max} \geq \varepsilon, \quad (9)$$

где $\varepsilon\tau_{\text{крит}}^{\max}$ — относительное отклонение от центра плана для образца с максимальной ОЭ.

$$\varepsilon\tau_{\text{крит}}^{\max} = \frac{\Delta\tau_{\text{крит}}^{\max}}{\tau_{\text{ц.п}}^{\max}} \cdot 100, \quad (10)$$

где $\Delta\tau_{\text{крит}}^{\max}$ — абсолютное отклонение образца с максимальной ОЭ от центра плана;

$\tau_{\text{ц.п}}^{\max}$ — ОЭ центра плана.

Если условие выполняется, то следующий этап оптимизации выполняется относительно нового центра плана.

Во втором случае, когда в результате эксперимента не удалось выявить новый максимум ОЭ, следует рассчитать новый экспериментальный план относительно старого центра плана, но с уменьшенным шагом. При этом сокращать шаг имеет смысл до тех пор, пока соблюдаются условия (1) и (11), т.е. пока увеличения ОЭ, вызванные изменениями рецептуры, являются значимыми относительно ошибки измерений:

$$S_{\text{оп-х. обр. от ц.п.}} > S, \quad (11)$$

где $S_{\text{оп-х. обр. от ц.п.}}$ — среднеквадратическое отклонение ОЭ опытных образцов относительно центра плана.

Если условие (11) перестает выполняться, то процесс оптимизации можно считать завершенным.

Материалы

¹ ГОСТ 30247.0–94. Конструкции строительные. Методы испытаний на огнестойкость. Общие требования.

Таблица 1. Рецепт базового ИОМ
Table 1. Basic IFRM composition

Образец Specimen	Наименование компонента Component	Содержание компонент, % Component content, %	Содержание компонентов в МП, % Component content in MP, %
1	Вода Water	20,00	20,00
2	Диспергатор Dispersing agent	2,00	2,00
3	Антифриз Antifreeze	1,00	1,00
4	Коалесцент Coalescing agent	0,60	0,60
5	Консервант Biocide	0,25	0,25
6	Пластификатор Plasticizer	2,00	2,00
7	Эмульгатор Emulsifying agent	0,70	0,70
8	Загуститель Thickening agent	0,25	0,25
9	Полимерная дисперсия ПВА Polymer dispersion PVA	15,00	15,00
10	Пеногаситель Defoamer	0,20	0,20
11	KYLIN APP201	18,70	58,00
12	Меламин Melamine	13,10	
13	Пентаэритрит Pentaerythritol	13,10	
14	BLR-698	13,10	
Итого		100,00	100,00

Для апробации метода многофакторной количественной оптимизации была выбрана базовая рецептура ИОМ (табл. 1) на основе водной дисперсии гомополимерного поливинилацетата (ПВА) «СТЕКВОЛ-101» (ООО «Норд-Синтез», Россия).

В огнезащитный состав входил следующий набор ФК:

- ФК1 — полифосфат аммония марки KYLIN APP 201 (Shifang Changfeng Chemical Ltd., Китай), технические характеристики приведены в табл. 2;
- ФК2 — меламин микронизированный технический (Zibo Aiheng New Material Co., Ltd), чистота не менее 99,8 %;
- ФК3 — пентаэритрит микронизированный технический (АО «Метафракс Кемикалс», Россия), чистота не менее 96 %;

Таблица 2. Технические характеристики полифосфата аммония марки KYLIN APP201 (HG/T2770–2008)

Table 2. Specification of ammonium polyphosphate KYLIN APP201 (HG/T2770–2008)

Характеристика Specification	Значение Value
Содержание P, % P content, %	31,72
Содержание N, % N content, %	14,63
Степень полимеризации, n Polymerization degree, n	1250
Размер частиц (< 45 мкм), % Particle size (<45 μm), %	>99
Средний размер частиц, мкм Average particle size, μm	18
Растворимость в воде, г/100 мл Solubility in water, g/100ml	<0,5

- ФК4 — диоксид титана рутильной формы марки BLR-698 с органической и неорганической обработкой Al_2O_3 , ZrO_2 (ООО «Витахим», Россия), чистота не менее 94 %.

Результаты и их обсуждение

Для базовой рецептуры ИОМ была составлена матрица плана (табл. 3) и рассчитаны добавочные количества МП на 200 г навески центра плана (нулевого образца).

По результатам первого этапа оптимизации был выбран новый центр плана — образец № 9 (табл. 4) с наибольшей ОЭ. На основании опыта работы с подобными ИОМ было принято решение уменьшить шаг оптимизации на втором этапе оптимизации.

На втором этапе оптимизации были приготовлены образцы ОИМ в соответствии с матрицей плана, приведенной в табл. 5, и проведено определение их ОЭ, которое выявило максимальное значение этого показателя для образца № 9, который был взят за центр плана для третьей итерации эксперимента. Шаг оптимизации был оставлен без изменения.

Результаты третьего этапа оптимизации (табл. 6) показали, что исследуемая рецептура достигла своего оптимума по показателю ОЭ. Образцы либо близки к центру плана по показателю ОЭ, либо показывают ухудшение огнезащитных свойств. Таким образом, на третьей итерации оптимизации рецептуры:

- система показала снижение ОЭ по сравнению с центром плана;
- достигнут аппаратный предел чувствительности метода оценки ОЭ, так как относительное отклонение от центра плана для образца с максимальной ОЭ меньше погрешности измерения по условию (9);

Таблица 3. Матрица первого этапа оптимизации

Table 3. First stage optimization matrix

Образец Specimen	ФК1 FC1	ФК2 FC2	ФК3 FC3	ФК4 FC4	Масса добавляемых МП, г Weight of added MP, g			
					ФК1 / FC1	ФК1 / FC1	ФК1 / FC1	ФК1 / FC1
0	0	0	0	0	0,00	0,00	0,00	0,00
1	0	0	0	1	0,00	0,00	0,00	8,80
2	0	0	1	0	0,00	0,00	8,80	0,00
3	0	0	1	1	0,00	0,00	8,80	8,80
4	0	1	0	0	0,00	8,80	0,00	0,00
5	0	1	0	1	0,00	8,80	0,00	8,80
6	0	1	1	0	0,00	8,80	8,80	0,00
7	0	1	1	1	0,00	8,80	8,80	8,80
8	1	0	0	0	13,20	0,00	0,00	0,00
9	1	0	0	1	13,20	0,00	0,00	8,80
10	1	0	1	0	13,20	0,00	8,80	0,00
11	1	0	1	1	13,20	0,00	8,80	8,80
12	1	1	0	0	13,20	8,80	0,00	0,00
13	1	1	0	1	13,20	8,80	0,00	8,80
14	1	1	1	0	13,20	8,80	8,80	0,00

Таблица 4. Результаты первого этапа оптимизации

Table 4. First optimization stage results

Образец Specimen	Кодированное обозначение Coded designation	Соотношение ФК FC ratio				ОЭ, мин FRE, min
		ФК1 FC1	ФК2 FC2	ФК3 FC3	ФК4 FC4	
0	0000	0,33	0,22	0,22	0,22	31
1	0001	0,32	0,21	0,21	0,25	33
2	0010	0,32	0,21	0,25	0,21	35
3	0011	0,31	0,21	0,24	0,24	35
4	0100	0,32	0,25	0,21	0,21	30
5	0101	0,31	0,24	0,21	0,24	35
6	0110	0,31	0,24	0,24	0,21	36
7	0111	0,30	0,23	0,23	0,23	30
8	1000	0,37	0,21	0,21	0,21	35
9*	1001	0,36	0,20	0,20	0,24	40
10	1010	0,36	0,20	0,24	0,20	30
11	1011	0,34	0,20	0,23	0,23	35
12	1100	0,36	0,24	0,20	0,20	37
13	1101	0,34	0,23	0,20	0,23	38
14	1110	0,34	0,23	0,23	0,20	32

$$h = 0,2$$

* Максимальное значение ОЭ для данной итерации.

* Maximum FE value for this iteration.

Таблица 5. Результаты второго этапа оптимизации
Table 5. Second optimization stage results

Образец Specimen	Кодированное обозначение Coded designation	Соотношение ФК FC ratio				ОЭ, мин FRE, min
		ФК1 FC1	ФК2 FC2	ФК3 FC3	ФК4 FC4	
0	0000	0,36	0,20	0,20	0,24	40
1	0001	0,35	0,20	0,20	0,26	41
2	0010	0,35	0,20	0,22	0,23	37
3	0011	0,34	0,19	0,21	0,25	37
4	0100	0,35	0,22	0,20	0,23	39
5	0101	0,34	0,21	0,19	0,25	42
6	0110	0,34	0,21	0,21	0,23	39
7	0111	0,34	0,21	0,21	0,25	40
8	1000	0,38	0,20	0,20	0,23	43
9*	1001	0,37	0,19	0,19	0,25	45
10	1010	0,37	0,19	0,21	0,23	40
11	1011	0,36	0,19	0,21	0,24	42
12	1100	0,37	0,21	0,19	0,23	43
13	1101	0,36	0,21	0,19	0,24	40
14	1110	0,36	0,21	0,21	0,22	42

$h = 0,1$

* Максимальное значение ОЭ для данной итерации.

* Maximum FRE value for this iteration.

Таблица 6. Результаты третьего этапа оптимизации
Table 6. Third optimization stage results

Образец Specimen	Кодированное обозначение Coded designation	Соотношение ФК FC ratio				ОЭ, мин FRE, min
		ФК1 FC1	ФК2 FC2	ФК3 FC3	ФК4 FC4	
0	0000	0,37	0,19	0,19	0,25	45
1	0001	0,36	0,19	0,19	0,26	43
2	0010	0,36	0,19	0,21	0,24	40
3	0011	0,36	0,18	0,20	0,26	43
4	0100	0,36	0,21	0,19	0,24	43
5	0101	0,36	0,20	0,18	0,26	41
6	0110	0,36	0,20	0,20	0,24	44
7	0111	0,35	0,20	0,20	0,26	42
8	1000	0,39	0,18	0,18	0,24	44
9	1001	0,38	0,18	0,18	0,26	43
10	1010	0,39	0,18	0,20	0,23	42
11	1011	0,38	0,18	0,19	0,25	45
12	1100	0,39	0,20	0,18	0,23	43
13	1101	0,38	0,19	0,18	0,25	44
14	1110	0,38	0,20	0,20	0,23	42

$h = 0,1$

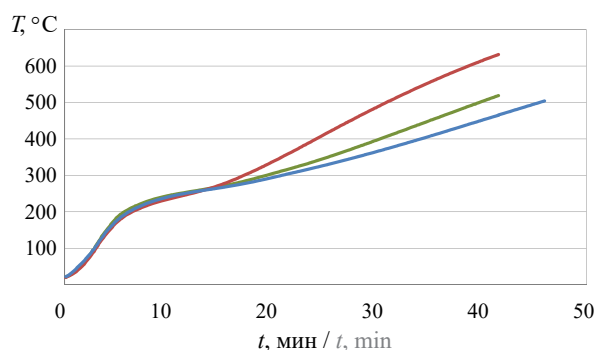


Рис. 1. Температурные кривые, полученные в ходе огневых испытаний: для базового состава (—), оптимума ОЭ из первого этапа оптимизации (—), оптимума из второго этапа (—)

Fig. 1. Temperature curves obtained during fire tests: for the base composition (—), FRE optimum from the first stage of optimization (—), optimum from the second stage (—)



Рис. 2. Внешний вид пенококка образца базовой рецептуры до оптимизации

Fig. 2. Appearance of the coked cellular material specimen of the basic composition before optimization

- дальнейшее сокращение шага невозможно по условию (1), что дает основание считать проведенную оптимизацию выполненной.

Таким образом, оптимальное соотношение ФК для данного ИОМ было достигнуто в образце № 9 второго этапа оптимизации. В результате первых двух этапов оптимизации удалось повысить ОЭ исследуемого состава с 31 до 45 мин (рис. 1).



Рис. 3. Внешний вид пенококка образца оптимальной рецептуры на втором этапе оптимизации

Fig. 3. Appearance of the coked cellular material specimen of the optimal composition after the 2nd stage of the optimization

Важно отметить, что наряду с целевым показателем — ОЭ при оптимизации произошли качественные улучшения огнезащитного покрытия, выражающиеся в большей однородности и сплошности пенококка, образующегося под действием термоудара (рис. 2 и 3).

Выводы

Был разработан методический подход многофакторной количественной оптимизации ИОМ, позволяющий проводить направленную работу по совершенствованию ОЭ данных средств огнезащиты стальных конструкций. При апробации метода в результате двух итерационных этапов было найдено оптимальное соотношение ФК для исследуемого ИОМ, что позволило улучшить огнезащитную эффективность рецептуры на 45 % по сравнению со значением для исходного неоптимизированного состава. Разработанную программу оптимизации можно рекомендовать для внедрения в процесс разработки других огнезащитных материалов.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Zybins O., Gravit M. Intumescent coatings for fire protection of building structures and materials. Berlin/Heidelberg, Germany : International Publishing, 2020. 210 p. DOI: 10.1007/978-3-030-59422-0
2. Ненахов С.А., Пименова В.П. Физико-химия вспенивающихся огнезащитных покрытий на основе полифосфата аммония : обзор литературы // Пожаровзрывобезопасность/Fire and Explosion Safety. 2010. № 8. С. 11–58.
3. Puri R.G., Khanna A.S. Intumescent coatings : a review on recent progress // Journal of Coatings Technology and Research. 2017. Vol. 14. Pp. 1–20. DOI: 10.1007/s11998-016-9815-3
4. Ненахов С.А., Пименова В.П., Натейкина Л.И. Влияние наполнителей на структуру пенококка на основе полифосфата аммония // Пожаровзрывобезопасность/Fire and Explosion Safety. 2009. № 7. С. 51–58.
5. Yew M.C., Ramli Sulong N.H., Yew M.K., Amalina M.A., Johan M.R. Influences of flame-retardant fillers on fire protection and mechanical properties of intumescent coatings // Progress in organic coatings. 2015. Vol. 78. Pp. 59–66. DOI: 10.1016/j.porgcoat.2014.10.006

6. Li H., Hu Z., Zhang S., Gu X., Wang H., Jiang P. *et al.* Effects of titanium dioxide on the flammability and char formation of water-based coatings containing intumescent flame retardants // *Progress in Organic Coatings*. 2015. Vol. 78. Pp. 318–324. DOI: 10.1016/j.porgcoat.2014.08.003
7. Mariappan T., Agarwal A., Ray S. Influence of titanium dioxide on the thermal insulation of waterborne intumescent fire protective paints to structural steel // *Progress in Organic Coatings*. 2017. Vol. 111. Pp. 67–74. DOI: 10.1016/j.porgcoat.2017.04.036
8. Галигузов А.А., Яшин Н.В., Авдеев В.В. Термостойкость огнезащитных материалов на основе ПВХ-пластиков различного состава // *Пластические массы*. 2023. № 11–12. С. 21–25. DOI: 10.35164/0554-2901-2023-11-12-21-25
9. Галигузов А.А., Сердан (младший) А.А., Яшин Н.В., Авдеев В.В. Влияние состава ПВХ-пластика на эксплуатационные свойства и огнезащитную эффективность полимерных материалов на его основе // *Пожаровзрывобезопасность/Fire and Explosion Safety*. 2023. № 5. С. 26–39. DOI: 10.22227/0869-7493.2023.32.05.26-39
10. Ng Y.H., Dasari A., Tan K.H., Qian L. Intumescent fire-retardant acrylic coatings: Effects of additive loading ratio and scale of testing // *Progress in Organic Coatings*. 2021. Vol. 150. P. 105985. DOI: 10.1016/j.porgcoat.2020.105985
11. Zeng Y., Weinell C.E., Dam-Johansen K., Ring L., Kiil S. Effects of coating ingredients on the thermal properties and morphological structures of hydrocarbon intumescent coating chars // *Progress in Organic Coatings*. 2020. Vol. 143. P. 105626. DOI: 10.1016/j.porgcoat.2020.105626
12. Liu S., Wang C., Hu Q., Huo S., Zhang Q., Liu Z. Intumescent fire retardant coating with recycled powder from industrial effluent optimized using response surface methodology // *Progress in Organic Coatings*. 2020. Vol. 140. P. 105494. DOI: 10.1016/j.porgcoat.2019.105494
13. Pimenta J.T., Gonçalves C., Hiliou L., Coelho J.F., Magalhaes F.D. Effect of binder on performance of intumescent coatings // *Journal of coatings technology and research*. 2016. Vol. 13. Pp. 227–238. DOI: 10.1007/s11998-015-9737-5
14. Chuang C.S., Wu C.Y., Wu K.C., Sheen H.J. Flame retardancy of water-based intumescent coatings with etherified melamine–formaldehyde and polyvinyl acetate copolymer hybrid resin // *Journal of Applied Polymer Science*. 2020. Vol. 137. Issue 31. P. 49279. DOI: 10.1002/app.49279
15. Cardoso A.P., de Sá S.C., Beraldo C.H., Hidalgo G.E., Ferreira C.A. Intumescent coatings using epoxy, alkyd, acrylic, silicone, and silicone–epoxy hybrid resins for steel fire protection // *Journal of Coatings Technology and Research*. 2020. Vol. 17. Pp. 1471–1488. DOI: 10.1007/s11998-020-00366-9
16. Архангельский И.В., Годунов И.А., Яшин Н.В., Нагановский Ю.К., Шорникова О.Н. Кинетика вспенивания терморасширяющихся огнезащитных составов // *Пожаровзрывобезопасность/Fire and Explosion Safety*. 2020. № 5. С. 71–81. DOI: 10.22227/PVB.2020.29.05.71-81
17. Dzulkafli H.H., Ahmad F., Ullah S., Hussain P., Mamat O., Megat-Yusoff P.S. Effects of talc on fire retarding, thermal degradation and water resistance of intumescent coating // *Applied Clay Science*. 2017. Vol. 146. Pp. 350–361. DOI: 10.1016/j.clay.2017.06.013
18. Zybina O., Gravit M., Stein Y. Influence of carbon additives on operational properties of the intumescent coatings for the fire protection of building constructions // *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*. IOP Publishing, 2017. Vol. 90. No. 1. P. 012227. DOI: 10.1088/1755-1315/90/1/012227
19. Morys M., Illerhaus B., Sturm H., Schartel B. Variation of intumescent coatings revealing different modes of action for good protection performance // *Fire technology*. 2017. Vol. 53. Pp. 1569–1587. DOI: 10.1007/s10694-017-0649-z
20. Yasir M., Amir N., Ahmad F., Ullah S., Jimenez M. Effect of basalt fibers dispersion on steel fire protection performance of epoxy-based intumescent coatings // *Progress in Organic Coatings*. 2018. Vol. 122. Pp. 229–238. DOI: 10.1016/j.porgcoat.2018.05.029
21. Трифонова О.Н. Оптимизация огнезащиты металлических конструкций // *Пожаровзрывобезопасность/Fire and Explosion Safety*. 2013. № 1. С. 58–62.
22. Архангельский И.В., Нагановский Ю.К., Годунов И.А., Яшин Н.В. Термоаналитический межлабораторный эксперимент по идентификации материалов и средств огнезащиты // *Пожарная безопасность*. 2020. № 3. С. 15–23. DOI: 10.37657/vniipr.pb.2020.63.99.001
23. Сильников М.В., Зыбина О.А., Полякова В.И., Гавахунова Р.А. Исследование влияния пентаэритрита на термолитический синтез огнезащитных коксовых покрытий // *Вопросы оборонной техники. Серия 16: Технические средства противодействия терроризму*. 2017. № 1–2. С. 41–45.
24. Устинов А.А., Зыбина О.А., Бабкин О.Э. Исследование влияния диоксида титана различных марок на характер термолитического разложения интумесцентных огнезащитных покрытий // *Лакокрасочные материалы и их применение*. 2018. № 5. С. 40–43.

REFERENCES

1. Zybina O., Gravit M. *Intumescent coatings for fire protection of building structures and materials*. Berlin/Heidelberg, Germany, International Publishing, 2020; 210. DOI: 10.1007/978-3-030-59422-0
2. Nenakhov S.A., Pimenova V.P. Physico-chemical foaming fire-retardant coatings based on ammonium polyphosphate : review of the Literature. *Pozharovzryvbezopasnost/Fire and explosion safety*. 2010; 19(8):11-58 (rus).
3. Puri R.G., Khanna A.S. Intumescent coatings : a review on recent progress. *Journal of Coatings Technology and Research*. 2017; 14:1-20. DOI: 10.1007/s11998-016-9815-3
4. Nenakhov S.A., Pimenova V.P., Nateikina L.I. Effect of fillers on the structure of ammonium polyphosphate-based foam coke. *Pozharovzryvbezopasnost/Fire and explosion safety*. 2009; 18(7):51-58. (rus).
5. Yew M.C., Sulong N.R., Yew M.K., Amalina M.A., Johan M.R. Influences of flame-retardant fillers on fire protection and mechanical properties of intumescent coatings. *Progress in organic coatings*. 2015; 78:59-66. DOI: 10.1016/j.porgcoat.2014.10.006
6. Li H., Hu Z., Zhang S., Gu X., Wang H., Jiang P. et al. Effects of titanium dioxide on the flammability and char formation of water-based coatings containing intumescent flame retardants. *Progress in Organic Coatings*. 2015; 78:318-324. DOI: 10.1016/j.porgcoat.2014.08.003
7. Mariappan T., Agarwal A., Ray S. Influence of titanium dioxide on the thermal insulation of waterborne intumescent fire protective paints to structural steel. *Progress in Organic Coatings*. 2017; 111:67-74. DOI: 10.1016/j.porgcoat.2017.04.036
8. Galiguzov A.A., Yashin N.V., Avdeev V.V. Thermal stability of fire-retardant materials based on PVC compounds of various compositions. *Plasticheskie massy*. 2024; 11-12:21-25. DOI: 10.35164/0554-2901-2023-11-12-21-25 (rus).
9. Galiguzov A.A., Serdan A.A., Yashin N.V., Avdeev V.V. Influence of PVC compound composition on the performance properties and flame retardant efficiency of polymer materials. *Pozharovzryvbezopasnost/Fire and Explosion Safety*. 2023; 32(5):26-39. DOI: 10.22227/0869-7493.2023.32.05.26-39 (rus).
10. Ng Y.H., Dasari A., Tan K.H., Qian L. Intumescent fire-retardant acrylic coatings: Effects of additive loading ratio and scale of testing. *Progress in Organic Coatings*. 2021; 150:105985. DOI: 10.1016/j.porgcoat.2020.105985
11. Zeng Y., Weinell C.E., Dam-Johansen K., Ring L., Kiil S. Effects of coating ingredients on the thermal properties and morphological structures of hydrocarbon intumescent coating chars. *Progress in Organic Coatings*. 2020; 143:105626. DOI: 10.1016/j.porgcoat.2020.105626
12. Liu S., Wang C., Hu Q., Huo S., Zhang Q., Liu Z. Intumescent fire-retardant coating with recycled powder from industrial effluent optimized using response surface methodology. *Progress in Organic Coatings*. 2020; 140:105494. DOI: 10.1016/j.porgcoat.2019.105494
13. Pimenta J.T., Gonçalves C., Hiliou L., Coelho J.F., Magalhaes F.D. Effect of binder on performance of intumescent coatings. *Journal of coatings technology and research*. 2016; 13:227-238. DOI: 10.1007/s11998-015-9737-5
14. Chuang C.S., Wu C.Y., Wu K.C., Sheen H.J. Flame retardancy of water-based intumescent coatings with etherified melamine-formaldehyde and polyvinyl acetate copolymer hybrid resin. *Journal of Applied Polymer Science*. 2020; 137(31):49279. DOI: 10.1002/app.49279
15. Cardoso A.P., de Sá S.C., Beraldo C.H., Hidalgo G.E., Ferreira C.A. Intumescent coatings using epoxy, alkyd, acrylic, silicone, and silicone-epoxy hybrid resins for steel fire protection. *Journal of Coatings Technology and Research*. 2020; 17:1471-1488. DOI: 10.1007/s11998-020-00366-9
16. Arkhangelsky I.V., Godunov I.A., Yashin N.V., Naganovsky Y.K., Shornikova O.N. The kinetics of intumescent flame-retardant foaming. *Pozharovzryvbezopasnost/Fire and explosion safety*. 2020; 29(5):71-81. DOI: 10.22227/PVB.2020.29.05.71-81 (rus).
17. Dzulkaffi H.H., Ahmad F., Ullah S., Hussain P., Mamat O., Megat-Yusoff P.S. Effects of talc on fire retarding, thermal degradation and water resistance of intumescent coating. *Applied Clay Science*. 2017; 146:350-361. DOI: 10.1016/j.clay.2017.06.013
18. Zybina O., Gravit M., Stein Y. Influence of carbon additives on operational properties of the intumescent coatings for the fire protection of building constructions. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*. IOP Publishing. 2017; 90(1):012227. DOI: 10.1088/1755-1315/90/1/012227
19. Morys M., Illerhaus B., Sturm H., Schartel B. Variation of intumescent coatings revealing different modes of action for good protection performance. *Fire technology*. 2017; 53:1569-1587. DOI: 10.1007/s10694-017-0649-z
20. Yasir M., Amir N., Ahmad F., Ullah S., Jimenez M. Effect of basalt fibers dispersion on steel fire protection performance of epoxy-based intumescent coatings. *Progress in Organic Coatings*. 2018; 122:229-238. DOI: 10.1016/j.porgcoat.2018.05.029
21. Trifonova O.N. Optimization of fire retardance for metal structures. *Pozharovzryvbezopasnost/Fire and explosion safety*. 2013; 22(1):58-62. (rus).
22. Arkhangelsky I.V., Naganovsky Y., Godunov I.A., Yashin N.V. Thermoanalytic interlaboratory experiment for identification of materials, substances and fire protection equipment. *Fire Safety*. 2020; 3:15-23. DOI: 10.37657/vniipo.pb.2020.63.99.001 (rus).

23. Silnikov M.V., Zybyina O.A., Polyakova V.I., Gavakhunova R.A. Research influence pentaerythritol on thermolytic synthesis of fire retardant coke oven coating. *Scientific and Technical Journal. Counter-terrorism technical devices*. 2017; 16(1-2):41-45. URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=29215826> (rus).
24. Ustinov A.A., Zybyina O.A., Babkin O.E. Research on the impact of titanium dioxide of different trademarks on the process of thermolysis of intumescent fire-protective coatings. *Paint and varnish materials and their application*. 2018; 5:40-43. URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=34992468> (rus).

Поступила 20.01.2024, после доработки 30.03.2024;

принята к публикации 10.04.2024

Received January 20, 2024; Received in revised form March 30, 2024;

Accepted April 10, 2024

Информация об авторах

КУЗНЕЦОВА Дарья Алексеевна, младший научный сотрудник, кафедра химической технологии и новых материалов, химический факультет, Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова, Россия 119234, г. Москва, Ленинские горы, 1, стр. 11; ORCID: 0009-0003-3366-6300; e-mail: ku.znetsova.daria@yandex.ru

ЯШИН Николай Владимирович, д-р хим. наук, старший научный сотрудник, кафедра химической технологии и новых материалов, химический факультет, Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова, Россия, 119234, г. Москва, Ленинские горы, 1, стр. 11; РИНЦ ID: 3248-5409; Scopus AuthorID: 6602800878; ResearcherID: D-8087-2015; ORCID: 0000-0002-2232-8192; e-mail: yashin-n@yandex.ru

АВДЕЕВ Виктор Васильевич, д-р хим. наук, профессор, заведующий кафедрой химической технологии и новых материалов, химический факультет, Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова, Россия 119234, г. Москва, Ленинские горы, 1, стр. 11, ORCID: 0000-0001-5573-2987; e-mail: avdeev@highp.chem.msu.ru

Вклад авторов:

Кузнецова Д.А. — концепция исследования; развитие методологии; проведение экспериментальных работ; обработка экспериментальных данных; написание исходного текста; итоговые выводы.

Яшин Н.В. — научное руководство; итоговые выводы; научное редактирование текста.

Авдеев В.В. — общее научное руководство; итоговые выводы.

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Information about the authors

Daria A. KUZNETSOVA, Junior Researcher, Chair of Chemical Technology and New Materials, Department of Chemistry, M.V. Lomonosov Moscow State University, Leninskie Gory, 1, Bldg. 11, 119234, Moscow, Russian Federation; ORCID: 0009-0003-3366-6300; e-mail: ku.znetsova.daria@yandex.ru

Nikolay V. YASHIN, Dr. Sci. (Chem.), Senior Researcher, Chemical Technology and New Materials, Department of Chemistry, M.V. Lomonosov Moscow State University, Leninskie Gory, 1, Bldg. 11, 119234, Moscow, Russian Federation; ID RISC: 3248-5409; Scopus AuthorID: 6602800878; ResearcherID: D-8087-2015; ORCID: 0000-0002-2232-8192; e-mail: yashin-n@yandex.ru

Victor V. AVDEEV, Dr. Sci. (Chem.), Professor, Head of Chair of Chemical Technology and New Materials, Department of Chemistry, M.V. Lomonosov Moscow State University, Leninskie Gory, 1, Bldg. 11, 119234, Moscow, Russian Federation; ORCID: 0000-0001-5573-2987; e-mail: avdeev@highp.chem.msu.ru

Contribution of the authors:

Kuznetsova D.A. — research concept; development of methodology; working out the experimental research and processing of experimental data; writing the original text; final conclusions.

Yashin N.V. — scientific guidance; final conclusions; scientific text editing.

Avdeev V.V. — general scientific guidance; final conclusions.

The authors declare that there is no conflict of interest.

Математическое моделирование воздействия фронта лесного пожара на ограждающие конструкции деревянного здания в сельском населенном пункте

Николай Викторович Барановский¹✉, Софья Андреевна Галаутдинова²,
Алексей Олегович Малинин¹

¹ Научно-образовательный центр И.Н. Бутакова Инженерной школы энергетики Национального исследовательского Томского политехнического университета, г. Томск, Россия

² ООО «Томскнефтехим», г. Томск, Россия

АННОТАЦИЯ

Введение. Лесные пожары ведут к экономическому ущербу государству, например, к повреждению и уничтожению гражданских и промышленных зданий в сельской местности. Цель исследования — разработка физико-математической модели воздействия фронта лесного пожара на ограждающие конструкции здания. Задачи исследования: 1) формулировка физической и математической моделей; 2) программная реализация математической модели на языке программирования высокого уровня; 3) численное исследование процессов теплопереноса в ограждающих конструкциях здания.

Методы. Рассматриваются низовой лесной пожар низкой интенсивности, низовой лесной пожар высокой интенсивности, верховой лесной пожар, огненный шторм. Рассматривается элемент двухслойной ограждающей конструкции деревянного здания с оконным проемом. Рассматривается воздействие конвективного теплового потока. Процессы теплопереноса в ограждающих конструкциях здания описываются системой нестационарных уравнений теплопроводности с соответствующими начальными и граничными условиями. Двумерные уравнения теплопроводности решены локально-одномерным методом. Для численной реализации представленной математической модели использован метод конечных разностей. Разностные аналоги дифференциальных уравнений в частных производных решены методом прогонки.

Результаты и их обсуждение. Получены распределения температуры в структурно неоднородном элементе ограждающей конструкции здания. Анализ показывает, что температурные поля практически одинаковые для различных сезонов возникновения лесных пожаров. Заметная разница отмечается только вблизи контакта ограждающей конструкции с почвой. В целом более высокая температура наблюдается в верхней части ограждающей конструкции на границе с кровлей здания. Стекло в оконном проеме нагревается до достаточно высоких температур, что в реальной ситуации приведет к его разрушению в период воздействия фронта лесного пожара. Оконный проем является самой уязвимой для пламени зоной в ограждающей конструкции. Кроме того, в результате численного моделирования установлено, что максимальные градиенты температур возникают в облицовочном материале.

Выводы. Предложены рекомендации по повышению пожарной безопасности зданий в сельской местности и применению предложенной физико-математической модели.

Ключевые слова: теплоперенос; конвективный тепловой поток; стена; облицовочный материал; программная реализация; пожарная безопасность

Для цитирования: Барановский Н.В., Галаутдинова С.А., Малинин А.О. Математическое моделирование воздействия фронта лесного пожара на ограждающие конструкции деревянного здания в сельском населенном пункте // Пожаровзрывобезопасность/Fire and Explosion Safety. 2024. Т. 33. № 3. С. 22–36. DOI: 10.22227/0869-7493.2024.33.03.22-36

✉ Барановский Николай Викторович, e-mail: firedanger@yandex.ru

Mathematical simulation of the impact of forest fire front on the enclosing structures of wooden building in rural settlement

Nikolay V. Baranovskiy¹✉, Sofya A. Galautdinova², Alexey O. Malinin¹

¹ I.N. Butakov Research Educational Center of School of Energy and Power Engineering of National Research Tomsk Polytechnic University, Tomsk, Russian Federation

² “Tomskneftekhim” Ltd, Tomsk, Russian Federation

ABSTRACT

Introduction. Forest fires lead to economic damage to the state, for example, damage and destruction of civil and industrial buildings in rural areas. The purpose of the study is to develop physical and mathematical models of the forest fire front impact on the building enclosures. Research objectives: 1) formulation of physical and mathematical models; 2) software implementation of a mathematical model in a high-level programming language; 3) numerical study of heat transfer processes in building enclosures.

Methods. A low-intensity surface forest fire, a high-intensity surface forest fire, a crown forest fire, and a fire storm are considered. An element of a two-layer enclosing structure of a wooden building with a window opening is considered. The effect of convective heat flow is considered. Heat transfer processes in the building enclosures are described by a system of non-stationary heat conduction equations with the corresponding initial and boundary conditions. Two-dimensional heat equations were solved using the locally one-dimensional method. For numerical implementation of the presented mathematical model, the finite difference method was used. Difference analogues of partial differential equations are solved by the marching method.

Results and discussion. Temperature distributions in a structurally inhomogeneous element of the building enclosures were obtained. The analysis shows that the temperature fields are almost the same for different seasons of forest fires. The noticeable difference is only near the contact of the enclosing structure with the soil. In general, higher temperatures are observed in the upper part of the building enclosures at the border with the roof of the building. The glass in the window opening is heated up to sufficiently high temperatures. This will lead to its destruction during the period of exposure to the forest fire front. The window opening is the most vulnerable area to flame in the building enclosures. In addition, as a result of numerical modelling, it was established that maximum temperature gradients occur in the cladding material.

Conclusion. Recommendations are proposed for improving the fire safety of buildings in rural areas and the application of the proposed physical and mathematical model were suggested.

Keywords: heat transfer; convective heat flux; wall; cladding material; software implementation; fire safety

For citation: Baranovskiy N.V., Galautdinova S.A., Malinin A.O. Mathematical simulation of the impact of forest fire front on the enclosing structures of wooden building in rural settlement. *Pozharovzryvbezopasnost/Fire and Explosion Safety*. 2024; 33(3):22-36. DOI: 10.22227/0869-7493.2024.33.03.22-36 (rus).

✉ Nikolay Viktorovich Baranovskiy, e-mail: firedanger@yandex.ru

Введение

Лесные пожары представляют собой катастрофическое явление, которое наносит, в том числе, экономический и социальный ущерб [1]. Первый выражается в количестве поврежденной или погибшей деловой древесины, а также в ущербе от уничтожения или повреждения сельских населенных пунктов, что имело место быть в последнее десятилетие [2, 3]. Социальный же ущерб выражается в числе пострадавших или погибших людей при лесных пожарах. На урбанизированных территориях жилые постройки могут быть вовлечены в процессы горения [4]. Основное воздействие лесного пожара направлено на ограждающие конструкции жилого здания или какой-либо постройки. Один из механизмов передачи тепла в случае воздействия открытого пламени лесного пожара — конвективный теплообмен [5]. Проведение масштабных экспериментов либо запрещено, либо затруднительно в силу невозможности проконтролировать все параметры процесса [6].

В настоящее время существуют различные варианты оценки пожарной безопасности жилых и промышленных объектов на урбанизированных территориях при активных лесных пожарах в их окрестности. Такие пожары могут иметь воздействие на данные объекты.

Можно выделить следующие методики и программные продукты, доступные в настоящее время.

1. Программная утилита PyroSim на основе FDS¹. Это зарубежная разработка NIST (National Institute of Standard and Technology). Fire Dynamic Simulator — это развитый программный продукт для моделирования пожаров. Данный пакет, помимо одиночного использования в среде операционной среды Windows, позволяет использовать библиотеку передачи сообщений MPI и интерфейс OpenMP (причем совместно) для параллельной обработки данных и вычислений. Вычислительная начинка пакета позволяет в стандартных условиях моделировать одномерный кондуктивный теплоперенос в материалах, хотя в стадии тестирования возможно 3D-моделирование данных процессов. Также функционал пакета позволяет моделировать пиролиз, горение и сажеобразование. Кроме того, в пакете заложена возможность моделирования распространения лесного пожара. PyroSim — программная оболочка для использования в качестве решателя программного пакета FDS. Это также зарубежная разработка², которая может потребовать замещения при переходе на отечественные программные продукты. В любой момент условия распространения данного программного обеспечения могут измениться. Вплоть до полного запрета на использование данного программного обеспечения на территории Российской Федерации. Особенно в текущих геополитических условиях.

¹ Fire Dynamic Simulator. URL: <https://pages.nist.gov/fds-smv/>

² URL: <https://www.thunderheadeng.com/pyrosim>

2. Методика определения расчетных величин пожарного риска на производственных объектах. Этот нормативный документ разработан в рамках Приказа МЧС РФ от 10 июля 2009 г. № 404³. В пункте «Общие положения» указано, что данная методика не распространяется на определение расчетных величин пожарного риска на производственных объектах, расположенных в лесах. Методика в принципе не предназначена для определения величин пожарного риска жилых и общественных зданий. Более того, методика предназначена для определения величины пожарного риска при возникновении очага пожара внутри рассматриваемого производственного объекта, а не при воздействии поражающих факторов лесного пожара.

3. Свод правил 4.13130⁴. Этот нормативный документ разработан в рамках Приказа от 24 апреля 2013 г. № 288 МЧС РФ⁵ в соответствии с Федеральным законом от 22 июля 2008 г. № 123-ФЗ⁶. Данный свод правил содержит только требования к жилым постройкам и относит их к тому или иному классу пожарной опасности. Аналогичная ситуация с объектами типа складов лесных материалов и других зданий, сооружений и объектов. Полезная для математического моделирования информация содержится в Приложении А5 (Методика определения безопасных противопожарных разрывов (расстояний) между жилыми, общественными зданиями и сооружениями). Здесь же приведена таблица с критическими значениями плотности лучистого теплового потока для различных материалов. Целью же данной статьи является изучение воздействия на материалы конвективного теплового потока.

4. Создание уникального программного кода собственной разработки. Последний вариант самый тяжелый и труднореализуемый, но именно он обеспечивает независимость разработки и эксплуатации такого программного обеспечения в условиях необходимого замещения импортной продукции. К настоящему времени создано достаточное число систем разработки программного обеспечения и вычислительных систем, например Microsoft Visual Studio⁷, Embarcadero RAD

Studio⁸, Matlab⁹ ANSYS¹⁰. Такие системы могут быть использованы для разработки вычислительных программ, которые моделируют процесс теплопереноса в ограждающих конструкциях жилого здания или постройки.

Использование вычислительных систем позволит исключить проведение опасных и дорогостоящих экспериментов по воздействию лесного пожара на жилые и прочие постройки в сельском населенном пункте или промышленном объекте. Кроме того, возможно проведение сценарного моделирования для оценки последствий различных вариантов воздействия лесного пожара на жилые и прочие постройки.

Цель исследования — разработка физико-математической модели воздействия фронта лесного пожара на ограждающие конструкции здания.

Краткий обзор литературы

Огромное количество как отдельных жилых зданий, так и целых поселений подвержено влиянию лесного пожара каждый год, особенно в районах, где строения интегрированы в лесной массив [7]. В течение последних десяти лет продолжает интенсифицироваться застройка лесных массивов зданиями разного назначения, и в будущем данное направление будет стремительно развиваться [8, 9]. Для данных регионов существенным фактором является риск возникновения лесного пожара, который может быть вызван как природными, так и техногенными факторами [10, 11].

Для того чтобы приступить к обсуждению мер по снижению риска воздействия лесного пожара через контроль за лесным горючим материалом, полезно провести классификацию земель [12]:

1. Зоны дикой природы, малодоступные человеку, и, как следствие, риск возникновения пожара по техногенным причинам минимален. Контроль за состоянием лесного горючего материала сводится к снижению мощности лесного пожара.

2. Основные зоны лесного управления, включающие более доступные участки леса, а также участки с деловой древесиной.

3. Жилые зоны. Участки, где соприкасаются границы домов с границами леса.

Часто контроль за лесными горючими материалами направлен на защиту мест массовых поселений и инфраструктурных объектов.

Вторая и третья зона могут быть далее условно разделены на три группы снижения риска [13]:

- единичные конструкции и примыкающее окружение;

³ Об утверждении методики определения расчетных величин пожарного риска на производственных объектах : Приказ МЧС РФ от 10 июля 2009 г. № 404. URL: <https://base.garant.ru/196118/?ysclid=lv7pzt8wbl453436576>

⁴ Свод правил 4.13130. Системы противопожарной защиты. Ограничение распространения пожара на объектах защиты. Требования к объемно-планировочным и конструктивным решениям. URL: <https://docs.cntd.ru/document/1200101593?ysclid=lv7q2m2xjq190034817>

⁵ Об утверждении Свода правил 4.131303 : Приказ от 24 апреля 2013 г. № 288.

⁶ Технический регламент о требованиях пожарной безопасности : Федеральный закон от 22.07.2008 № 123-ФЗ (ред. от 14.07.2022).

⁷ URL: <https://visualstudio.microsoft.com/ru/>

⁸ URL: <https://www.embarcadero.com/ru/products/rad-studio>

⁹ URL: <https://www.mathworks.com/products/matlab.html>

¹⁰ URL: <https://www.ansys.com/>

- границы между населенными пунктами и дикой растительностью;
- дикая растительность между населенными пунктами.

Необходимость подготовки к лесным пожарам привела к тому, что за последние 30 лет были внедрены компьютерные технологии в процессы моделирования поведения пожара [14], определения местоположения и состояния лесного горючего материала [15, 16], а также составления карт риска возникновения лесного пожара на больших территориях [17, 18].

Такое продвижение в области картографии было реализовано в значительной степени за счет различных геопространственных технологий, включая географические информационные системы (ГИС) и дистанционное зондирование. Данные технологии позволяют проводить экономическую оценку различных особенностей ландшафта без проведения длительных экспедиций в исследуемую область [19].

В последнее время работы в области моделирования воздействия пламени на деревянные конструкции постепенно переходят от вероятностных моделей к детерминированным моделям. При этом возможно моделирование конструктивных элементов зданий.

Так, например, в [20] было произведено численное моделирование шпоночного соединения, полученные результаты имели хорошее согласование с ранее полученными экспериментальными данными. Данный факт свидетельствовал, что компонентная модель может моделировать соединения древесины при огневом воздействии с высокой точностью. В [21] производилось моделирование деревянного соединения двух балок, соединения в виде ласточкиного хвоста. Методом исследования был выбран метод конечных элементов, моделирование происходило в программной среде ANSYS, полученные результаты имели хорошее согласование с ранее полученными экспериментальными данными.

Работа [22] посвящена созданию математической модели структурного поведения деревянных колонн при пожаре для оценки несущей способности деревянных колонн. Особое внимание было уделено критическим нагрузкам на изгиб. Были получены зависимости влияния коэффициента упругости, уровня нагрузки и влажности на критические нагрузки на изгиб. До этого были проведены натурные огневые испытания колонн [23, 24], однако они имели ряд таких недостатков, как дороговизна, плохая повторяемость и достоверность результатов [25]. Поэтому в данной области исследований активно развива-

ются аналитические, численные, полуэмпирические и эмпирические методы.

Физико-математическая постановка

В качестве физической модели была взята одно-квартирная деревянная постройка, расположенная вблизи лесного массива, охваченного пожаром. Фронт лесного пожара распространяется с малой скоростью в условиях отсутствия ветра. Ограждающая конструкция данной постройки представлена в виде двухслойной пластины. Первый слой облицовка, второй древесина. Тепло от фронта лесного пожара передается к стенке конвекцией. Главным параметром безопасности деревянной постройки является факт воспламенения (или не воспламенения) ограждающей конструкции деревянной постройки при достижении достаточной температуры на поверхности.

При составлении физической модели были сделаны следующие допущения:

- рассматривается теплопередача в ограждающей конструкции за счет кондукции;
- рассматривается двумерная постановка;
- очаг пожара задается параметрически;
- теплофизические свойства древесины и стекла не зависят от температуры;
- наличие лакокрасочного покрытия пренебрегается;
- предполагается катастрофический сценарий пожарной погоды, когда в поверхностном слое стены отсутствует влага;
- пиролиз древесины пренебрегается;
- стена двухслойная с оконным проемом.

В табл. 1 представлены теплофизические характеристики древесины и облицовочных материалов¹¹.

В табл. 2 представлены теплофизические характеристики теплоизоляционных и облицовочных материалов.

В табл. 3 представлены теплофизические характеристики различных видов пожаров.

Таблица 1. Теплофизические характеристики древесины и облицовочных материалов¹⁰

Table 1. Thermophysical characteristics of wood and cladding materials¹⁰

Материал Material	c , Дж/(кг·К) c , J/(kg·K)	ρ , кг/м ³ ρ , kg/m ³	λ , Дж/(м·К) λ , J/(m·K)
Сосна Pine	1670	500	0,12
Облицовочный картон Building-paper	2300	100	0,18

¹¹ URL: <https://novosibirsk.leroymerlin.ru/product/blok-haus-hvoya-28h146h3000-mm-sort-optima-3-sht-1-31-m-81947969/#nav-characteristics>

В табл. 4 представлены теплофизические характеристики стекла.

В табл. 5 представлены исходные данные для численного моделирования.

В целях математического моделирования стены деревянного строения можно упрощенно представить как слоистую структуру, на которую оказывает воздействие конвективный тепловой поток от фронта лесного пожара. Так как стена деревянного дома состоит из двух основных слоев: древесины и теплоизоляционного/облицовочного материала, а также стекольного проема, то в качестве идеальной модели рассмотрим двумерную двухслойную модель деревянного строения (рис. 1),

Таблица 2. Теплофизические характеристики теплоизоляционных и облицовочных материалов¹² [26, 27]

Table 2. Thermophysical characteristics of thermal insulation and cladding materials¹² [26, 27]

Материал Material	c , Дж/(кг·К) c , J/(kg·K)	ρ , кг/м ³ ρ , kg/m ³	λ , Дж/(м·К) λ , J/(m·K)
Асбестовый картон Asbestos Board	1500	1600	0,4
Сайдинг «блок-хаус хвоя» Siding “log-cabin pine”	2700	500	0,14

Таблица 3. Теплофизические характеристики различных видов пожаров

Table 3. Thermophysical characteristics of various types of fires

Вид пожара Fire type	T , К	α , Вт/(м ² ·К) α , W/(m ² ·K)
Огненный смерч Firestorm	1200	200
Верховой пожар Crown fire	1100	150
Низовой пожар высокой интенсивности High-intensity surface fire	1000	110
Низовой пожар низкой интенсивности Low-intensity surface fire	900	80

Таблица 4. Теплофизические характеристики стекла [28]

Table 4. Thermophysical characteristics of glass [28]

Материал Material	c , Дж/(кг·К) c , J/(kg·K)	ρ , кг/м ³ ρ , kg/m ³	λ , Дж/(м·К) λ , J/(m·K)
Стекло Glass	703	2500	0,76

¹² URL: tat/1428075110.html#:~:text=Характеристика%20ПТЭ-100%3A%20Плотность%3A%2084%20,-120%20до%20%2B700%20Упаковка%20ПТЭ-100%3A

в которой тепло передается посредством теплопроводности.

На рис. 2 представлена схема области решения.

Математически процесс теплопередачи описывается системой нестационарных дифференциальных уравнений теплопроводности с соответствующими начальными и граничными условиями. Метод конечных разностей используется для решения дифференциальных уравнений в частных производных [29–31].

Таблица 5. Исходные данные для численного моделирования

Период года Season	Толщина слоя, см Layer thickness, cm	Материал Material	Время воздействия, с Exposure time, s	Вид пожара Fire type
Лето ($T_0 = 25^\circ\text{C}$) Summer ($T_0 = 25^\circ\text{C}$)	50	Сосна Pine	50	Низовой пожар высокой интенсивности High-intensity surface fire

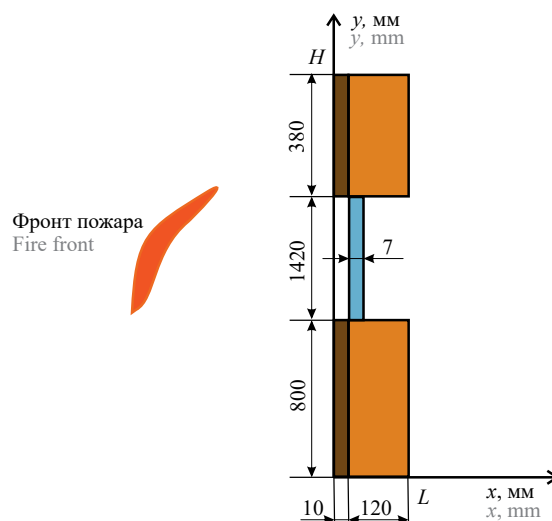


Рис. 1. Геометрическая постановка задачи

Fig. 1. Geometric formulation of the problem

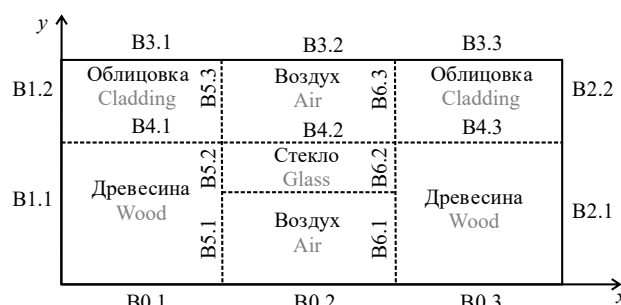


Рис. 2. Схема области решения

Fig. 2. Solution domain diagram

Математическая модель представлена ниже. Система уравнений процесса теплопередачи представляет собой:

$$\begin{aligned}\rho_1 c_1 \frac{\partial T_1}{\partial t} &= \frac{\partial}{\partial x} \left(\lambda_1 \frac{\partial T_1}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\lambda_1 \frac{\partial T_1}{\partial y} \right); \\ \rho_2 c_2 \frac{\partial T_2}{\partial t} &= \frac{\partial}{\partial x} \left(\lambda_2 \frac{\partial T_2}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\lambda_2 \frac{\partial T_2}{\partial y} \right); \\ \rho_3 c_3 \frac{\partial T_3}{\partial t} &= \frac{\partial}{\partial x} \left(\lambda_3 \frac{\partial T_3}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\lambda_3 \frac{\partial T_3}{\partial y} \right); \\ \rho_4 c_4 \frac{\partial T_4}{\partial t} &= \frac{\partial}{\partial x} \left(\lambda_4 \frac{\partial T_4}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\lambda_4 \frac{\partial T_4}{\partial y} \right).\end{aligned}$$

Начальные и граничные условия:

$$\begin{aligned}T_i|_{t=0} &= T_{i0}; \\ \text{B0.1: } -\lambda_1 \frac{\partial T_1}{\partial x} \Big|_{x=0} &= \alpha_{\text{вн}} (T_{\text{вн}} - T_1); \\ \text{B0.2: } T_4 &= T_e; \\ \text{B0.3: } -\lambda_1 \frac{\partial T_1}{\partial x} \Big|_{x=0} &= \alpha_{\text{вн}} (T_{\text{вн}} - T_1); \\ \text{B1.1: } -\lambda_1 \frac{\partial T_1}{\partial y} \Big|_{y=0} &= \alpha_{\text{поч}} (T_{\text{поч}} - T_1); \\ \text{B1.2: } -\lambda_2 \frac{\partial T_2}{\partial y} \Big|_{y=0} &= \alpha_{\text{поч}} (T_{\text{поч}} - T_2); \\ \text{B2.1: } -\lambda_1 \frac{\partial T_1}{\partial y} \Big|_{y=0} &= \alpha_{\text{окр}} (T_{\text{окр}} - T_2); \\ \text{B2.2: } -\lambda_2 \frac{\partial T_2}{\partial y} \Big|_{y=0} &= \alpha_{\text{окр}} (T_{\text{окр}} - T_2); \\ \text{B3.1: } -\lambda_2 \frac{\partial T_2}{\partial x} \Big|_{x=0} &= \alpha_{\text{окр}} (T_{\text{окр}} - T_2); \\ \text{B3.2: } -\lambda_4 \frac{\partial T_4}{\partial x} \Big|_{x=0} &= \alpha_{\text{окр}} (T_{\text{окр}} - T_4); \\ \text{B3.3: } -\lambda_2 \frac{\partial T_2}{\partial x} \Big|_{x=0} &= \alpha_{\text{окр}} (T_{\text{окр}} - T_2); \\ \text{B4.1: } -\lambda_1 \frac{\partial T_1}{\partial x} \Big|_{x=xb} &= -\lambda_2 \frac{\partial T_2}{\partial x} \Big|_{x=xb}, \quad T_1 = T_2;\end{aligned}$$

$$\text{B4.2: } -\lambda_3 \frac{\partial T_3}{\partial x} \Big|_{x=xb} = \alpha_{\text{окр}} (T_{\text{окр}} - T_3);$$

$$\text{B4.3: } -\lambda_1 \frac{\partial T_1}{\partial x} \Big|_{x=xb} = -\lambda_2 \frac{\partial T_2}{\partial x} \Big|_{x=xb}, \quad T_1 = T_2;$$

$$\text{B5.1: } -\lambda_1 \frac{\partial T_1}{\partial x} \Big|_{y=xb} = -\lambda_4 \frac{\partial T_4}{\partial x} \Big|_{y=xb}, \quad T_1 = T_4;$$

$$\text{B5.2: } -\lambda_1 \frac{\partial T_1}{\partial x} \Big|_{y=xb} = -\lambda_3 \frac{\partial T_3}{\partial x} \Big|_{y=xb}, \quad T_1 = T_3;$$

$$\text{B5.3: } -\lambda_2 \frac{\partial T_2}{\partial x} \Big|_{y=xb} = -\lambda_4 \frac{\partial T_4}{\partial x} \Big|_{y=xb}, \quad T_2 = T_4;$$

$$\text{B6.1: } -\lambda_4 \frac{\partial T_4}{\partial x} \Big|_{y=xb} = -\lambda_1 \frac{\partial T_1}{\partial x} \Big|_{y=xb}, \quad T_4 = T_1;$$

$$\text{B6.2: } -\lambda_3 \frac{\partial T_3}{\partial x} \Big|_{y=xb} = -\lambda_1 \frac{\partial T_1}{\partial x} \Big|_{y=xb}, \quad T_3 = T_1;$$

$$\text{B6.3: } -\lambda_4 \frac{\partial T_4}{\partial x} \Big|_{y=xb} = -\lambda_2 \frac{\partial T_2}{\partial x} \Big|_{y=xb}, \quad T_4 = T_2,$$

где T_i , λ_i , c_i , ρ_i — температура, теплопроводность, теплоемкость и плотность i -го элемента ограждающей конструкции;

t — время;

$B_{j,k}$ — границы области решения и подобластей;

x, y — пространственные координаты;

$\alpha_{\text{вн}}$ — коэффициент теплоотдачи с внутренним пространством строения;

$T_{\text{окр}}$, $T_{\text{вн}}$, $T_{\text{поч}}$, T_0 — температура фронта пламени, внутреннего пространства, почвы и в начальный момент времени;

$\alpha_{\text{поч}}$ — коэффициент теплопередачи на границе с почвой;

$\alpha_{\text{окр}}$ — коэффициент теплоотдачи с окружающей средой (фронтом пожара).

Результаты и обсуждение

В рамках первого сценария рассматривается воздействие фронта верхового лесного пожара на ограждающую конструкцию деревянного здания в различные сезоны года. Облицовка стен выполнена из сайдинга «блок-хаус хвоя». Второй изготовлен из сосновой древесины. Время воздействия фронта пламени на ограждающие конструкции 300 с (табл. 6). Распределение температур для летнего периода представлено на рис. 3.

Анализ полученных зависимостей показывает, что распределения температур практически одинаковые для различных сезонов возникновения верховых

Таблица 6. Исходные данные для численного моделирования
Table 6. Input data for numerical modelling

Период года Season	Материал Material	Облицовоч- ный материал Cladding	Время воздей- ствия, с Exposure time, s
Осень ($T_0 = 15\text{ }^{\circ}\text{C}$) Autumn ($T_0 = 15\text{ }^{\circ}\text{C}$)	Сосна Pine	Сайдинг «блок-хаус хвоя» Siding “log-cabin pine”	300
Весна ($T_0 = 20\text{ }^{\circ}\text{C}$) Spring ($T_0 = 20\text{ }^{\circ}\text{C}$)			
Лето ($T_0 = 25\text{ }^{\circ}\text{C}$) Summer ($T_0 = 25\text{ }^{\circ}\text{C}$)			

лесных пожаров. Заметная разница только вблизи контакта ограждающей конструкции с почвой. В целом более высокая температура наблюдается в верхней части ограждающей конструкции на границе с кровлей здания. Причем видно, что фронт пламени воздействует и со стороны стены, и со стороны кровли. На рисунке видно, что стекло в оконном проеме нагревается до достаточно высоких температур, что в реальной ситуации приведет к его разрушению в период воздействия фронта верхового лесного пожара. Оконный проем является самой уязвимой для пламени зоной в ограждающей конструкции. Кроме того, в результате численного моделирования установлено, что максимальные градиенты температур возникают в облицовочном материале. По величине они примерно одинаковые как для случая использования облицовочного материала, так и для случая необлицованной древесины. Как показывает анализ результатов, температура поверхностного слоя выше критической температуры для любого типа облицовочного материала. Кроме того, облицовочный слой прогревается на глубину 1 см. Разница в температуре поверхности и поверхностного слоя 40–80 К не имеет значения. Все виды облицовки не могут быть рассмотрены в качестве противопожарной защиты.

Следует предположить, что в этом случае владелец здания может использовать только предварительные меры для минимизации ущерба, а именно удаление кустарников и прокладку минерализованных полос на определенном расстоянии от здания. Речь идет о зданиях, расположенных на так называемых урбанизированных территориях, когда лесная растительность перемежается с постройками того же сельского населенного пункта. В качестве возможной альтернативы человек должен обеспечить возможность покинуть здание в период возникновения лесного пожара на сопредельной лесопокрытой территории, чтобы избежать травм, ожогов и летального исхода

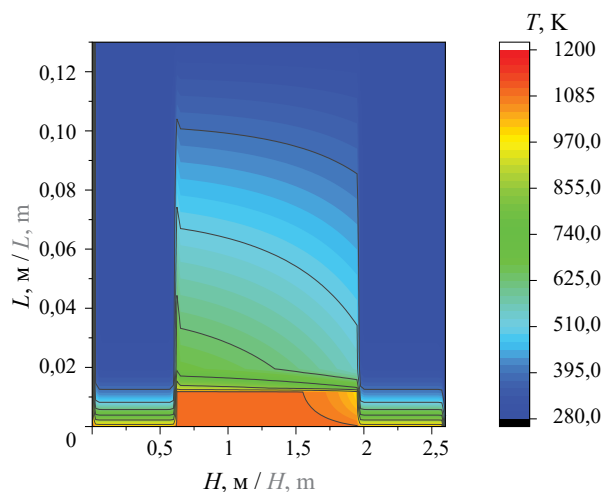


Рис. 3. Распределение температуры в слоистой структуре деревянного строения, выполненного из сосны и сайдинга «блок-хаус хвоя» для летнего сезона при условии воздействия верхового лесного пожара (300 с)

Fig. 3. Temperature distribution in the layered structure of a wooden structure made of pine and siding “log-cabin pine” subjected to exposure of a crown forest fire for the summer season (300 s)

в условиях активных лесных пожаров. В рамках второго сценария рассмотрены варианты воздействия различных типов лесных пожаров на ограждающие конструкции деревянного здания (табл. 7). Время воздействия 300 с.

На рис. 4 представлены результаты моделирования воздействия различных видов лесного пожара на слоистую структуру деревянного строения, выполненного из сосны и сайдинга «блок-хаус хвоя». Как было установлено в результате моделирования, ограждающие конструкции нагреваются в основном на стадии, предшествующей воспламенению, и нагрев происходит в поверхностных слоях облицовки толщиной около 2 см (максимальные градиенты температуры в приповерхностном слое облицовочного материала толщиной 1 см).

Анализ представленных распределений температуры показывает, что опасные температуры достигаются при всех видах лесных пожаров, фронт которых непосредственно воздействует на ограждающую конструкцию деревянного здания. Даже минимальные температуры фронта низового лесного пожара низкой интенсивности при непосредственном контакте с облицовочными материалами могут вызвать воспламенение здания. Максимальные же температуры достигаются в приповерхностном слое облицовочного материала при сценарии воздействия огненного смерча (наиболее опасная разновидность верхового лесного пожара). Ранжирование различных типов лесных пожаров по степени опасности для деревянного здания следующее (от максимального к минимальному): огненный смерч, верховой лесной пожар,

Таблица 7. Исходные данные для численного моделирования
Table 7. Input data for numerical modelling

Период года Season	Вид пожара Fire type	Материал Material	Облицовочный материал Cladding	Время воздействия, с Exposure time, s	Толщина слоя, м Layer thickness, m
Лето ($T_0 = 25\text{ }^{\circ}\text{C}$) Summer ($T_0 = 25\text{ }^{\circ}\text{C}$)	Низовой пожар низкой интенсивности Low-intensity surface fire	Сосна Pine	Сайдинг «блок-хаус хвоя» Siding “log-cabin pine”	300	0,5
	Низовой пожар высокой интенсивности High-intensity surface fire				
	Верховой пожар Crown fire				
	Огненный смерч Firestorm				

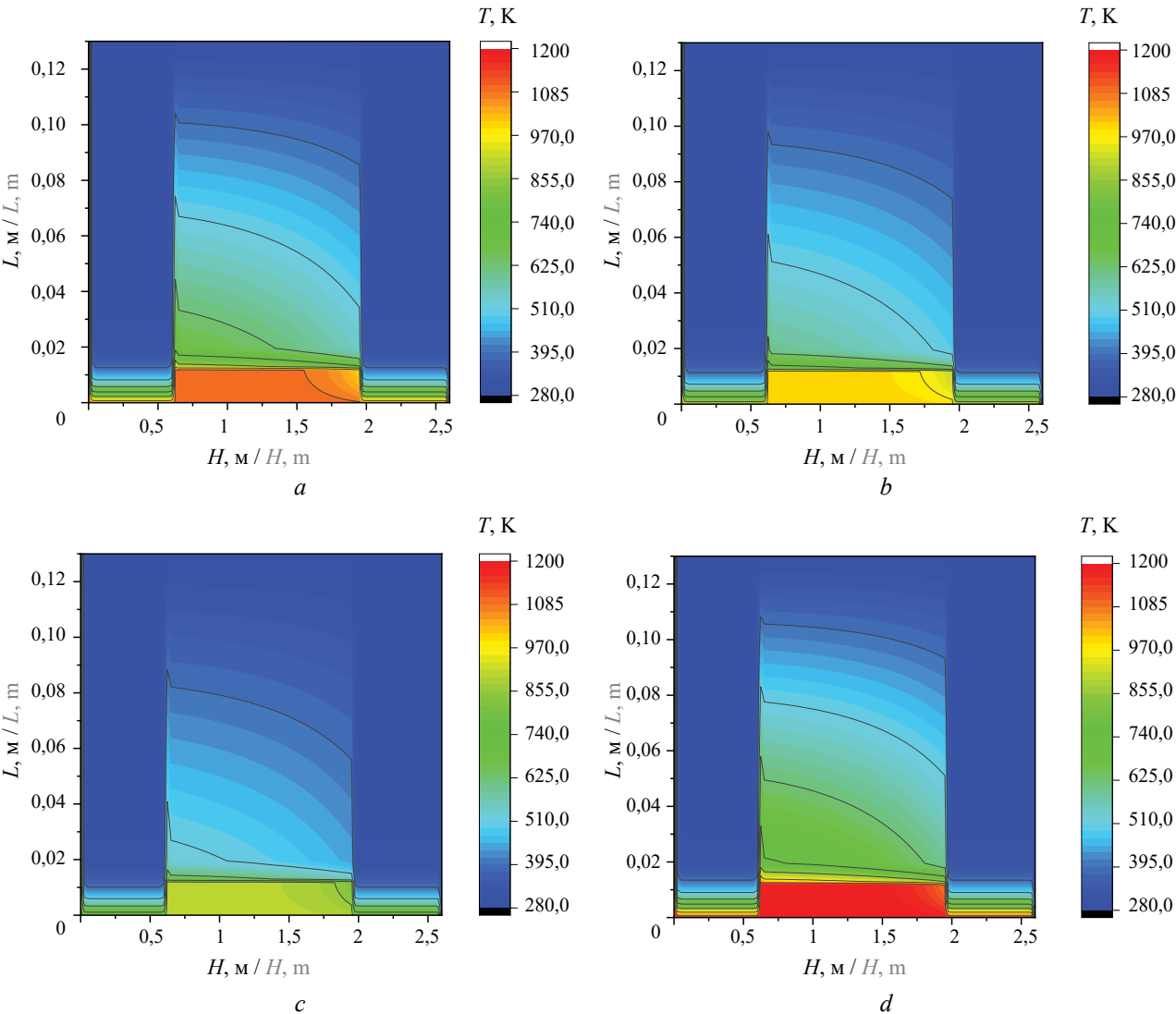


Рис. 4. Распределение температуры в слоистой структуре деревянного строения, выполненного из древесины сосны и сайдинга «блок-хаус хвоя» при условии воздействия различных видов лесных пожаров (300 с): *a* — верховой пожар; *b* — низовой пожар высокой интенсивности; *c* — низовой пожар низкой интенсивности; *d* — огненный смерч
Fig. 4. Temperature distribution in the layered structure of a wooden structure made of pine wood and siding “log-cabin pine” subjected to exposure of various types of forest fires (300 s): *a* — crown fire; *b* — high-intensity surface fire; *c* — low-intensity surface fire; *d* — firestorm

низовой лесной пожар высокой интенсивности, низовой лесной пожар низкой интенсивности.

В рамках третьего сценария было исследовано воздействие лесного пожара разной продолжительности (на примере низового лесного пожара высокой интенсивности) (табл. 8).

На рис. 5 представлены распределения температуры в слоистой структуре деревянного строения, выполненного из сосны и сайдинга «блок-хаус хвоя» при условии воздействия низового пожара высокой интенсивности (варьируется время воздействия от 50 до 600 с).

Сравнительный анализ показывает, что с увеличением длительности воздействия лесного пожара на деревянное строение увеличивается температура в приповерхностном слое облицовочного материала. Причем при малых временах воздействия (порядка 50 с) глубина прогрева приповерхностного слоя ограждающей конструкции минимальна. Можно ожидать, что при таких воздействиях на деревоклееные материалы присутствующее в их составе сухое органическое вещество не будет подвергнуто термическому разложению, достаточному для выделения газообразных продуктов пиролиза. При минимальных градиентах температуры в приповерхностном слое минимальной глубины воспламенения материала ограждающей конструкции деревянного здания может и не произойти, и в худшем случае оно будет носить случайный характер. Однако стекло в оконном проеме все равно нагревается до температур, при которых возможно его разрушение. Это может приводить к негативным последствиям для жильцов такого здания. Логично, что длительное воздействие ведет к более глубокому прогреву ограждающей конструкции и максимальным температурам приповерхностного слоя. Поэтому важно обеспечить жилую застройку средствами противопожарной борьбы, которые бы могли быть применены на начальной стадии воздействия лесного пожара. Также следует еще раз указать на необходимость обеспечить отсут-

ствие лесных горючих материалов на территории, примыкающей к деревянному зданию. Такие лесные горючие материалы в условиях приближающегося фронта лесного пожара будут служить проводниками горения. Отдельно следует обсудить опасность оконного проема. Можно рекомендовать оборудовать оконные проемы ставнями, которыми можно было бы закрыть стекло и минимизировать опасность разрушения стекла и проникновения пламени и продуктов сгорания в оконный проем, разрушенный в результате воздействия лесного пожара.

Достоверность полученных результатов подтверждается использованием апробированных численных методов [29], а также тестирования разработанного алгоритма и программной реализации на задачах с известным ответом [32]. Кроме того, был проведен анализ сходимости полученных результатов на последовательности сгущающихся сеток по пространству и времени. Результаты численного моделирования с использованием различных сеточных параметров приведены в табл. 9.

Таблица 9. Результаты исследования сходимости алгоритма на последовательности сгущающихся сеток

Table 9. Results of the convergence study of the algorithm on a sequence of refined grids

Номер Number	N	M	dt	T_{ij}	Режим Mode
1	10	10	1	394,60	Неточный Inaccurate
2	100	100	1	392,61	Неточный Inaccurate
3	1000	1000	1	392,89	Достаточный Sufficient
4	10	10	0,1	395,11	Неточный Inaccurate
5	100	100	0,1	392,88	Достаточный Sufficient
6	1000	1000	0,1	393,15	Избыточный Excess
7	10	10	0,01	395,16	Неточный Inaccurate
8	100	100	0,01	392,90	Достаточный Sufficient
9	1000	1000	0,01	393,17	Избыточный Excess
10	10	10	0,001	395,17	Неточный Inaccurate
11	100	100	0,001	392,90	Избыточный Excess
12	1000	1000	0,001	393,17	Избыточный Excess

Таблица 8. Исходные данные для численного моделирования

Период года Season	Вид пожара Fire type	Материал Material	Облицовочный материал Cladding	Время воздействия, с Exposure time, s
Лето ($T_0 = 25^\circ\text{C}$) Summer ($T_0 = 25^\circ\text{C}$)	Низовой пожар высокой интенсивности High-intensity surface fire	Сосна Pine	Сайдинг «блок-хаус хвоя» Siding “log-cabin pine”	50
				150
				300
				450
				600

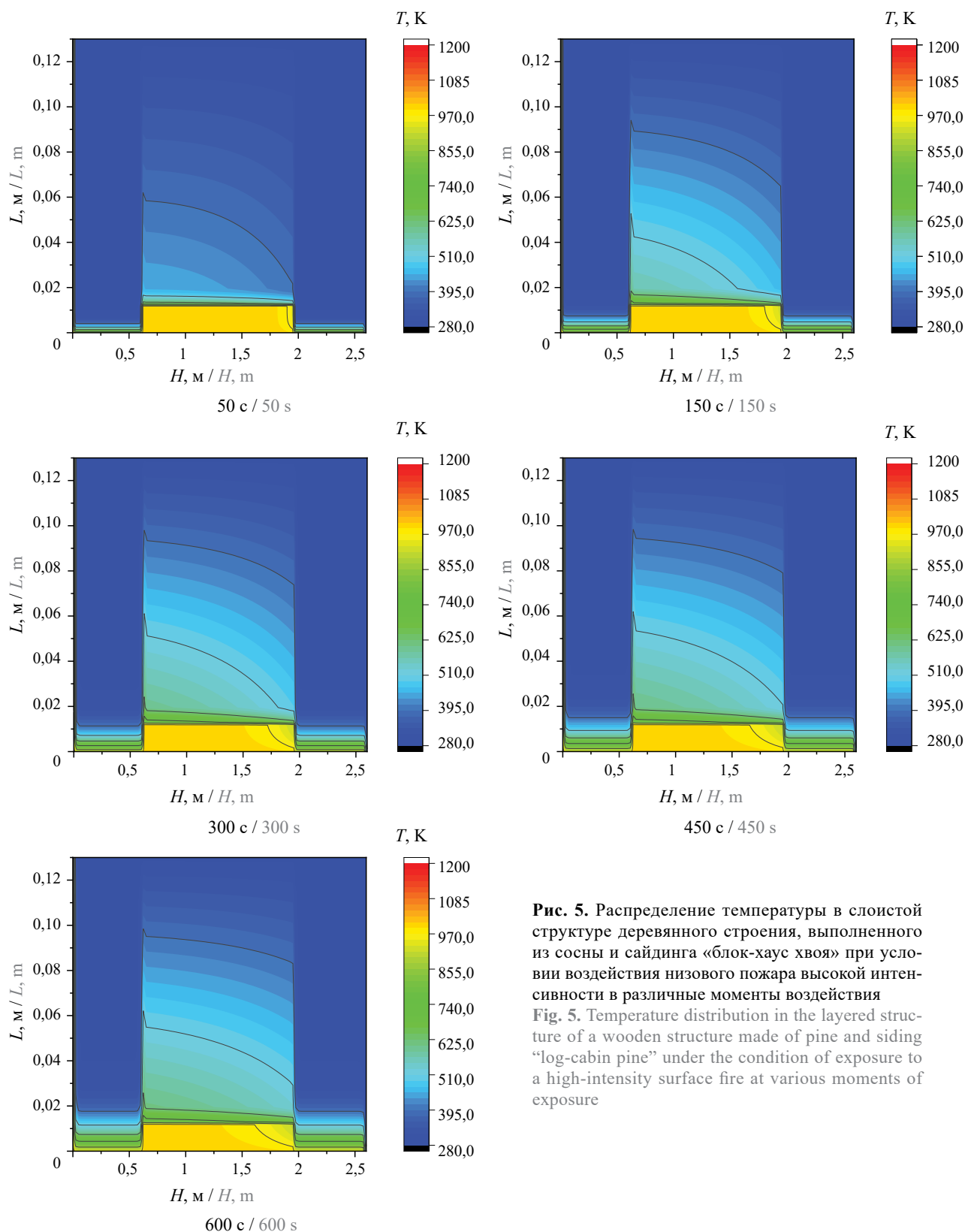


Рис. 5. Распределение температуры в слоистой структуре деревянного строения, выполненного из сосны и сайдинга «блок-хаус хвоя» при условии воздействия низового пожара высокой интенсивности в различные моменты воздействия

Fig. 5. Temperature distribution in the layered structure of a wooden structure made of pine and siding “log-cabin pine” under the condition of exposure to a high-intensity surface fire at various moments of exposure

Критерием оценки режима моделирования являлась величина разности температур по модулю в контрольной точке для двух разных режимов, характеризующихся заданным количеством узлов по пространству и времени. Результаты моделиро-

вания позволили провести классификацию режимов по шкале: Неточный, Достаточный, Избыточный. Неточный режим характеризовался разницей температур в контрольной точке более 1 К. Достаточный режим характеризовался разницей темпера-

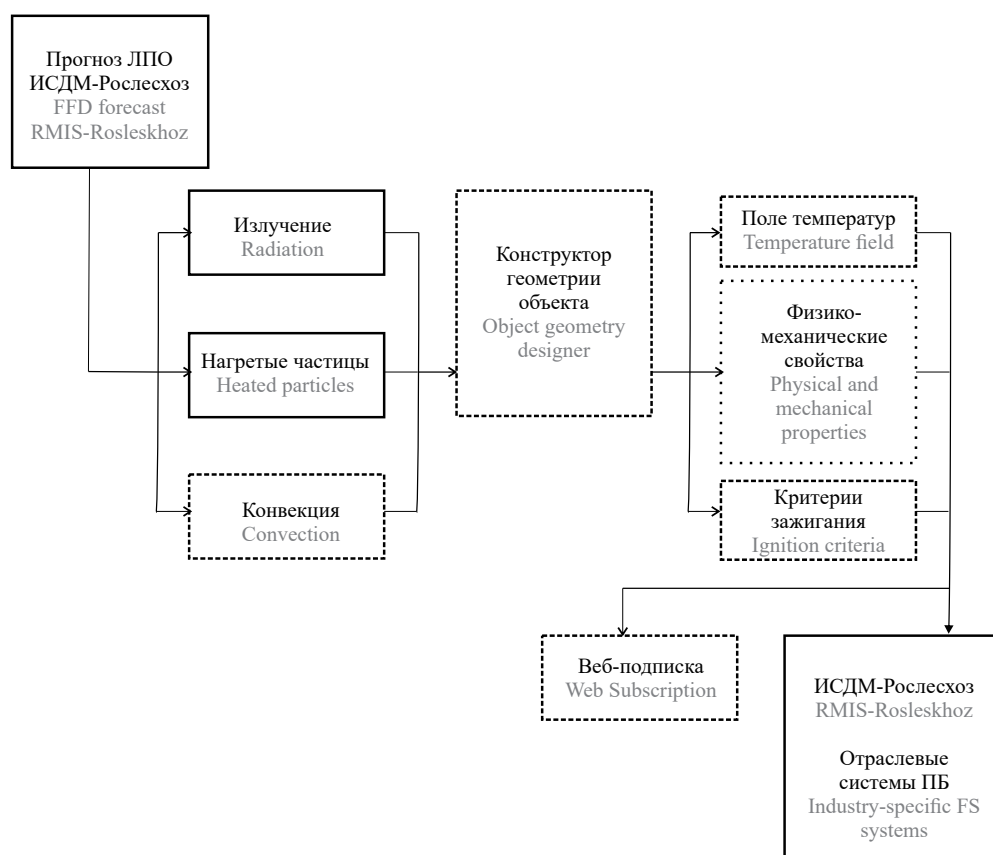


Рис. 6. Структура разрабатываемой информационно-вычислительной системы прогнозирования воздействия лесного пожара на жилые постройки

Fig. 6. Structure of the developed information and computing system for predicting the impact of a forest fire on residential buildings

тур в контрольной точке менее 1 К. Дальнейшие режимы с увеличенным числом узлов расчетной сетки по пространству и/или времени считались избыточными.

В будущих исследованиях целесообразно выполнить моделирование воздействия лесного пожара на реальной территории с учетом расположения объектов, чтобы получить результаты сравнительного анализа теоретических следствий с данными наблюдений и сделать выводы о показателях эксплуатации разработанного программного кода с учетом последствий возникновения реально зафиксированных лесных пожаров. При этом в последующих исследованиях также следует учесть следующие данные для моделирования лесного пожара: расстояние от жилой постройки до лесного массива, интенсивность тепловыделения от кромки лесного пожара, скорость ветра и местные погодные условия и ряд других параметров.

На рис. 6 представлена структурная схема возможного программного продукта для оценки воздействия поражающих факторов лесного пожара на жилые постройки, например, в сельском населенном пункте. Исходные данные по прогнозу лесной пожарной опасности должны поставляться в разрабатываемый программный продукт из Инфор-

мационной системы дистанционного мониторинга лесных пожаров ИСДМ-Рослесхоз. Сплошной границей на рис. 6 обозначены реализованные к настоящему моменту компоненты информационно-вычислительной системы по оценке влияния лесного пожара на жилое помещение. Отрывистой линией обозначены блоки, которые в настоящее время находятся в стадии разработки. Точечной линией обозначены блоки, которые будет также необходимо разработать при реализации будущих исследований. Потребителем прогнозной информации будет та же самая ИСДМ-Рослесхоз или отраслевые системы оценки пожарной безопасности.

Невозможно учесть все факторы в рамках одной статьи. Кроме того, проведение такого комплексного исследования требует также использовать экспериментальные установки. Такое исследование уже запланировано, и выполняются отдельные фрагменты данного большого проекта.

Кроме того, принято решение о разработке отдельного приложения под операционную систему Windows с графическим интерфейсом пользователя. Базовые элементы такого приложения представлены на примере простейшей программной утилиты, которая будет использована как исходная платформа для разработки конечного программного продукта.

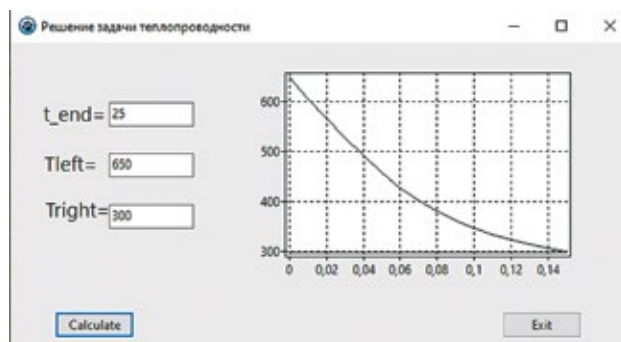


Рис. 7. Прототип графического интерфейса пользователя программного продукта, который предстоит разработать на основе текущих и будущих исследований (типичные элементы управления, ввода исходных данных и визуализации прогнозной информации)

Fig. 7. Prototype of the graphical user interface of the software product to be developed based on current and future studies (typical elements of control, input of initial data and visualization of predicted information)

Типовые элементы будущего приложения представлены на скриншоте работы упрощенного прототипа информационно-вычислительной системы на рис. 7.

В реальном приложении будут учтены и другие теплофизические, физико-химические и физико-механические параметры и процессы. Приложение будет обладать функционалом для ввода исходной информации, анализа данных и визуализации прогнозной информации или генерации файлов результатов, данные из которых могут быть импортированы в Информационную систему дистанционного мониторинга лесных пожаров ИСДМ-Рослесхоз.

Выводы

В результате исследования разработана физико-математическая модель для расчета параметров теплопереноса в ограждающей конструкции сельского здания в условиях воздействия конвективного теплового потока от фронта лесного пожара. Применение предложенной математической модели возможно при разработке специализированного программного обеспечения для оценки пожарной безопасности зданий в сельских населенных пунктах, в том числе с использованием геоинформационных технологий и данных дистанционного зондирования со спутниковых систем оптического диапазона высокого разрешения. Получены основные результаты:

1. Сформулирована детерминированная математическая модель для исследования теплопереноса в элементе ограждающей конструкции сельского здания.
2. Разработана программная реализация указанной математической модели на языке программирования высокого уровня.
3. Получены поля температур в структурно неоднородной ограждающей конструкции с учетом параметров воздействия лесного пожара.
4. Предложена структура разрабатываемой информационно-вычислительной системы оценки влияния лесного пожара на ограждающие конструкции.
5. Предложены компоненты для разработки программного приложения с графическим интерфейсом пользователя.
6. Предложены рекомендации по обеспечению пожарной безопасности здания на территории сельского населенного пункта.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Baranovskiy N.V., Kuznetsov G.V. Forest fire occurrences and ecological impact prediction : monograph. Novosibirsk : Publishing House of the Siberian Branch of the Russian Academy of Science, 2017. 254 p. DOI: 10.15372/FOREST2017BNV
2. Mell W.E., Manzello S.L., Maranghides A., Butry D., Rehm R.G. The wildland-urban interface fire problem — current approaches and research needs // International Journal of Wildland Fire. 2010. Vol. 19. Pp. 238–251. DOI: 10.1071/WF07131
3. Baranovskiy N., Malinin A. Mathematical simulation of forest fire impact on industrial facilities and wood-based buildings // Sustainability. 2020. Vol. 12. No. 13. P. 5475. DOI: 10.3390/su12135475
4. Craveiro H.D., Fiorini C., Laim L., Guillaume B., Santiago A. Experimental and numerical evaluation of a wildland-urban interface fire scenario // Applied Sciences. 2023. Vol. 13. No. 24. P. 13236. DOI: 10.3390/app132413236
5. Валендик Э.Н., Косов И.В. Влияние теплового излучения лесного пожара на окружающую среду // Сибирский экологический журнал. 2008. № 4. С. 517–523.
6. Menemenlis D., Palaologou P., Kalabokidis K. Wildfire-residential risk analysis using building characteristics and simulations to enhance structural fire resistance in Greece // Fire. 2023. Vol. 6. No. 10. P. 403. DOI: 10.3390/fire6100403
7. Rodriguez-Jimenez F., Fernandes P.M., Fernández-Guisuraga J.M., Alvarez X., Lorenzo H. Drivers and trends in the size and severity of forest fires endangering WUI areas : a regional case study // Forests. 2023. Vol. 14. No. 12. P. 2366. DOI: 10.3390/f14122366
8. Nowak D.J., Walton J.T. Projected urban growth (2000–2050) and its estimated impact on the US forest resource // Journal of Forestry. 2005. Vol. 103. Pp. 383–389. DOI: 10.1093/jof/103.8.383

9. Aksoy E., Kocer A., Yilmaz İ., Akçal A.N., Akpınar K. Assessing fire risk in wildland–urban interface regions using a machine learning method and GIS data : the example of Istanbul’s European Side // *Fire*. 2023. Vol. 6. P. 408. DOI: 10.3390/fire6100408
10. de la Fuente-Mella H., Elórtegui-Gómez C., Umaña-Hermosilla B., Fonseca-Fuentes M., Ríos-Vásquez G. Stochastic approaches systems to predictive and modeling Chilean wildfires // *Mathematics*. 2023. Vol. 11. P. 4346. DOI: 10.3390/math11204346
11. Jiao Q., Fan M., Tao J., Wang W., Liu D., Wang P. Forest fire patterns and lightning-caused forest fire detection in Heilongjiang province of china using satellite data // *Fire*. 2023. Vol. 6. P. 166. DOI: 10.3390/fire6040166
12. Arno S.F., Brown J.K. Managing fire in our forests — time for a new alternative // *Journal of Forestry*. 1989. Vol. 87. Pp. 44–46.
13. Bevers M., Omi P.N., Hof J. Random location of fuel treatments in wildland community interfaces : a percolation approach // *Canadian Journal of Forest Research*. 2004. Vol. 34. Pp. 164–173. DOI: 10.1139/X03-204
14. Meng Q., Lu H., Huai Y., Xu H., Yang S. Forest fire spread simulation and fire extinguishing visualization research // *Forests*. 2023. Vol. 14. P. 1371. DOI: 10.3390/f14071371
15. Shi Y., Feng C., Zhang L., Huang W., Wang X., Yang S. et al. Characterizing forest fuel properties and potential wildfire dynamics in Xiuwu, Henan, China // *Fire*. 2024. Vol. 7. P. 7. DOI: 10.3390/fire7010007
16. Xi Z., Chasmer L., Hopkinson C. Delineating and reconstructing 3D forest fuel components and volumes with terrestrial laser scanning // *Remote Sens*. 2023. Vol. 15. P. 4778. DOI: 10.3390/rs15194778
17. Gould N.P., Pomara L.Y., Nepal S., Goodrick S.L., Lee D.C. Mapping firescapes for wild and prescribed fire management : a landscape classification approach // *Land*. 2023. Vol. 12. P. 2180. DOI: 10.3390/land12122180
18. Preisler H., Brillinger D., Burgan R., Benoit J. Probability based models for simulation of wildfire risk // *International Journal of Wildland Fire*. 2004. Vol. 13. Pp. 133–142. DOI: 10.1071/WF02061
19. Pragma, Kumar M., Tiwari A., Majid S.I., Bhadwal S., Sahu N. et al. Integrated spatial analysis of forest fire susceptibility in the Indian Western Himalayas (IWH) using remote sensing and GIS-Based Fuzzy AHP approach // *Remote Sensing*. 2023. Vol. 15. P. 4701. DOI: 10.3390/rs15194701
20. Cachim P.B., Franssen J.M. Numerical modelling of timber connection under fire loading using a component model // *Fire Safety Journal*. 2009. Vol. 44. Pp. 840–853. DOI: 10.1016/j.firesaf.2009.03.013
21. Regueira R., Guaita M. Numerical simulation of the fire behavior of timber dovetail connections // *Fire Safety Journal*. 2018. Vol. 96. Pp. 1–12. DOI: 10.1016/j.firesaf.2017.12.005
22. Schnabl S., Turk G., Planinc I. Buckling of timber columns exposed to fire // *Fire Safety Journal*. 2011. Vol. 46. Pp. 431–439. DOI: 10.1016/j.firesaf.2011.07.003
23. Ali F., Kavanagh S. Fire resistance of timber columns // *Journal of the Institute of Wood Science*. 2005. Vol. 17. Pp. 85–93.
24. Lie T.T. A method for assessing the fire resistance of laminated timber beams and columns // *Canadian Journal of Civil Engineering*. 1997. Vol. 4. Pp. 161–169. DOI: 10.1139/l77-02
25. Purkiss J.A. *Fire Safety Engineering Design of Structures*. Second ed., Elsevier/Butterworth-Heinemann, Oxford, 2007.
26. Baranovskiy N.V., Malinin A.O. Mathematical simulation of heat transfer in the structures of a passenger carriage under the influence of forest fires // *International Review on Modelling and Simulations*. 2021. Vol. 14 (4). Pp. 231–241. DOI: 10.15866/iremos.v14i4.20818
27. Mai Y.W., Jacob L.J.S. Thermal stress fracture of solar control window panes caused by shading of incident radiation // *Materiaux et Construction*. 1980. Vol. 13. Pp. 283–288.
28. Туричин Г.А., Лопота В.А., Абдурахманов А.А., Сысоев В.К. Математическое моделирование нагрева и испарения кварцевого стекла при лазерном синтезе нанопорошков // *Физика и химия обработки материалов*. 2006. С. 49–54.
29. Самарский А.А., Вабищевич П.Н. *Вычислительная теплопередача*. М. : Эдиториал УРСС, 2003. 784 с.
30. Baranovskiy N.V. Complex three-dimensional mathematical model of the ignition of a coniferous tree via a cloud-to-ground lightning discharge: electrophysical, thermophysical and physico-chemical processes // *Forests*. 2023. Vol. 14. P. 1936. DOI: 10.3390/f14101936
31. Baranovskiy N.V., Podorovskiy A., Malinin A. Parallel implementation of the algorithm to compute forest fire impact on infrastructure facilities of JSC Russian railways // *Algorithms*. 2021. Vol. 14. P. 333. DOI: 10.3390/a14110333
32. Кузнецов Г.В., Шеремет М.А. *Разностные методы решения задач теплопроводности*. Томск : Изд-во ТПУ, 2007. 172 с.

REFERENCES

1. Baranovskiy N.V., Kuznetsov G.V. *Forest fire occurrences and ecological impact prediction : monograph*. Novosibirsk, Publishing House of the Siberian Branch of the Russian Academy of Science, 2017; 254. DOI: 10.15372/FOREST2017BNV
2. Mell W.E., Manzello S.L., Maranghides A., Butry D., Rehm R.G. The wildland-urban interface fire problem — current approaches and research needs. *International Journal of Wildland Fire*. 2010; 19:238-251. DOI: 10.1071/WF07131
3. Baranovskiy N., Malinin A. Mathematical simulation of forest fire impact on industrial facilities and wood-based buildings. *Sustainability*. 2020; 12(13):5475. DOI: 10.3390/su12135475
4. Craveiro H.D., Fiorini C., Laím L., Guillaume B., Santiago A. Experimental and numerical evaluation of a wildland-urban interface fire scenario. *Applied Sciences*. 2023; 13(24):13236. DOI: 10.3390/app132413236
5. Valendik E.N., Kosov I.V. The influence of thermal radiation from a forest fire on the environment. *Siberian Ecological Journal*. 2008; 4:517-523. (rus).
6. Menemenlis D., Palaiologou P., Kalabokidis K. Wildfire-residential risk analysis using building characteristics and simulations to enhance structural fire resistance in Greece. *Fire*. 2023; 6(10):403. DOI: 10.3390/fire6100403
7. Rodriguez-Jimenez F., Fernandes P.M., Fernández-Guisuraga J.M., Alvarez X., Lorenzo H. Drivers and trends in the size and severity of forest fires endangering WUI Areas : a regional case study. *Forests*. 2023; 14(12):2366. DOI: 10.3390/f14122366
8. Nowak D.J., Walton J.T. Projected urban growth (2000–2050) and its estimated impact on the US forest resource. *Journal of Forestry*. 2005; 103:383-389. DOI: 10.1093/jof/103.8.383
9. Aksoy E., Kocer A., Yilmaz İ., Akçal A.N., Akpinar K. Assessing fire risk in wildland-urban interface regions using a machine learning method and GIS data : the example of Istanbul's European Side. *Fire*. 2023; 6:408. DOI: 10.3390/fire6100408
10. de la Fuente-Mella H., Elórtégui-Gómez C., Umaña-Hermosilla B., Fonseca-Fuentes M., Ríos-Vásquez G. Stochastic approaches systems to predictive and modeling Chilean wildfires. *Mathematics*. 2023; 11:4346. DOI: 10.3390/math11204346
11. Jiao Q., Fan M., Tao J., Wang W., Liu D., Wang P. Forest fire patterns and lightning-caused forest fire detection in Heilongjiang province of China using satellite data. *Fire*. 2023; 6:166. DOI: 10.3390/fire6040166
12. Arno S.F., Brown J.K. Managing fire in our forests — time for a new alternative. *Journal of Forestry*. 1989; 87:44-46.
13. Bevers M., Omi P.N., Hof J. Random location of fuel treatments in wildland community interfaces: a percolation approach. *Canadian Journal of Forest Research*. 2004; 34:164-173. DOI: 10.1139/X03-204
14. Meng Q., Lu H., Huai Y., Xu H., Yang S. Forest fire spread simulation and fire extinguishing visualization research. *Forests*. 2023; 14:1371. DOI: 10.3390/f14071371
15. Shi Y., Feng C., Zhang L., Huang W., Wang X., Yang S. et al. Characterizing forest fuel properties and potential wildfire dynamics in Xiuwu, Henan, China. *Fire*. 2024; 7:7. DOI: 10.3390/fire7010007
16. Xi Z., Chasmer L., Hopkinson C. Delineating and reconstructing 3D forest fuel components and volumes with terrestrial laser scanning. *Remote Sens*. 2023; 15:4778. DOI: 10.3390/rs15194778
17. Gould N.P., Pomara L.Y., Nepal S., Goodrick S.L., Lee D.C. Mapping firescapes for wild and prescribed fire management: a landscape classification approach. *Land*. 2023; 12:2180. DOI: 10.3390/land12122180
18. Preisler H., Brillinger D., Burgan R., Benoit J. Probability based models for simulation of wildfire risk. *International Journal of Wildland Fire*. 2004; 13:133-142. DOI: 10.1071/WF02061
19. Pragya, Kumar M., Tiwari A., Majid S.I., Bhadwal S., Sahu N. et al. Integrated spatial analysis of forest fire susceptibility in the Indian Western Himalayas (IWH) using remote sensing and GIS-based fuzzy AHP approach. *Remote Sensing*. 2023; 15:4701. DOI: 10.3390/rs15194701
20. Cachim P.B., Franssen J.M. Numerical modelling of timber connection under fire loading using a component model. *Fire Safety Journal*. 2009; 44:840-853. DOI: 10.1016/j.firesaf.2009.03.013
21. Regueira R., Guaita M. Numerical simulation of the fire behavior of timber dovetail connections. *Fire Safety Journal*. 2018; 96:1-12. DOI: 10.1016/j.firesaf.2017.12.005
22. Schnabl S., Turk G., Planinc I. Buckling of timber columns exposed to fire. *Fire Safety Journal*. 2011; 46:431-439. DOI: 10.1016/j.firesaf.2011.07.003
23. Ali F., Kavanagh S. Fire resistance of timber columns. *Journal of the Institute of Wood Science*. 2005; 17:85-93.
24. Lie T.T. A method for assessing the fire resistance of laminated timber beams and columns. *Canadian Journal of Civil Engineering*. 1997; 4:161-169. DOI: 10.1139/l77-02
25. Purkiss J.A. *Fire Safety Engineering Design of Structures*. Second ed., Elsevier/Butterworth-Heinemann, Oxford, 2007.

26. Baranovskiy N.V., Malinin A.O. Mathematical simulation of heat transfer in the structures of a passenger carriage under the influence of forest fires. *International Review on Modelling and Simulations*. 2021; 14(4):231-241. DOI: 10.15866/iremos.v14i4.20818
27. Mai Y.W., Jacob L.J.S. Thermal stress fracture of solar control window panes caused by shading of incident radiation. *Materiaux et Construction*. 1980; 13:283-288.
28. Turichin G.A., Lopota V.A., Abdurakhmanov A.A., Sysoev V.K. Mathematical modeling of heating and evaporation of quartz glass during laser synthesis of nanopowders. *Physics and chemistry of materials processing*. 2006; 49-54. (rus).
29. Samarskiy A.A., Vabishchevich P.N. *Computational heat transfer*. Moscow, Editorial URSS, 2003; 784. (rus).
30. Baranovskiy N.V. Complex three-dimensional mathematical model of the ignition of a coniferous tree via a cloud-to-ground lightning discharge: electrophysical, thermophysical and physico-chemical processes. *Forests*. 2023; 14:1936. DOI: 10.3390/f14101936
31. Baranovskiy N.V., Podorovskiy A., Malinin A. Parallel implementation of the algorithm to compute forest fire impact on infrastructure facilities of JSC Russian railways. *Algorithms*. 2021; 14:333. DOI: 10.3390/a14110333
32. Kuznetsov G.V., Sheremet M.A. *Difference methods for solving heat conduction problems*. Tomsk, TPU Publishing House, 2007; 172. (rus).

Поступила 14.12.2023, после доработки 15.03.2024;

принята к публикации 22.04.2024

Received December 14, 2023; Received in revised form March 15, 2024;

Accepted April 22, 2024

Информация об авторах

БАРАНОВСКИЙ Николай Викторович, канд. физ.-мат. наук, доцент, Научно-образовательный центр И.Н. Бутакова Инженерной школы энергетики Национального исследовательского Томского политехнического университета, Россия, 634050, г. Томск, пр-т Ленина, 30; Scopus AuthorID: 6505672018; ResearcherID: A-4224-2014; ORCID: 0000-0001-9202-8171; e-mail: firedanger@yandex.ru

ГАЛАУТДИНОВА Софья Андреевна, ведущий инженер по учету энергоресурсов, ООО «Томскнефтехим», Россия, 634067, г. Томск, Кузовлевский тракт, 2, стр. 202; ORCID: 0009-0002-1267-438X; e-mail: myazina.sonya@mail.ru

МАЛИНИН Алексей Олегович, аспирант, Научно-образовательный центр И.Н. Бутакова Инженерной школы энергетики Национального исследовательского Томского политехнического университета, Россия, 634050, г. Томск, пр-т Ленина, 30; Scopus AuthorID: 57218138726; ResearcherID: JVN-8309-2024; ORCID: 0009-0002-3242-6543; e-mail: norrischakovich@mail.ru

Вклад авторов:

Барановский Н.В. — концептуализация; методология; руководство; исследование; программное обеспечение; валидация; визуализация; написание — подготовка оригинального проекта; написание — рецензирование и редактирование.

Галаутдинова С.А. — исследование; программное обеспечение; валидация; визуализация; написание — подготовка оригинального проекта.

Малинин А.О. — исследование; программное обеспечение; валидация; визуализация; написание — подготовка оригинального проекта.

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Information about the authors

Nikolay V. BARANOVSKIY, Dr. Sci. (Phys.-Math.), Associate Professor, I.N. Butakov Research Educational Center of School of Energy and Power Engineering of National Research Tomsk Polytechnic University, Lenin Av., 30, Tomsk, 634050, Russian Federation; Scopus AuthorID: 6505672018; ResearcherID: A-4224-2014; ORCID: 0000-0001-9202-8171; e-mail: firedanger@yandex.ru

Sofya A. GALAUTDINOVA, Leading Engineer, Tomskneftekhim Ltd, Kuzovlevskiy Tract, 2, Bldg. 202, Tomsk, 634067, Russian Federation, ORCID: 0009-0002-1267-438X; e-mail: myazina.sonya@mail.ru

Alexey O. MALININ, Postgraduate Student, I.N. Butakov Research Educational Center of School of Energy and Power Engineering of National Research Tomsk Polytechnic University, Lenin Av., 30, Tomsk, 634050, Russian Federation; Scopus AuthorID: 57218138726; ResearcherID: JVN-8309-2024; ORCID: 0009-0002-3242-6543; e-mail: norrischakovich@mail.ru

Contribution of the authors:

Baranovskiy N.V. — conceptualization; methodology; supervision; investigation; software; validation; visualization; writing — original draft preparation; writing — review and editing.

Galautdinova S.A. — investigation; software; validation; visualization; writing — original draft preparation.

Malinin A.O. — investigation; software; validation; visualization; writing — original draft preparation.

Authors not declare conflict of interest.

Оценка пожарной опасности эластичных резервуаров на основе термогравиметрического анализа

Евгений Викторович Ширяев¹✉, Сергей Александрович Шабунин²,
Сергей Александрович Швырков¹

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

² Ивановская пожарно-спасательная академия Государственной противопожарной службы Министерства Российской Федерации по делам гражданской обороны, чрезвычайным ситуациям и ликвидации последствий стихийных бедствий, г. Иваново, Россия

АННОТАЦИЯ

Введение. Ежегодно появляются новые виды полимерных композитных материалов, которые применяются для изготовления быстровозводимых мягких резервуаров. Данные материалы испытывают на механическую и химическую стойкость, при этом изучению их пожароопасных свойств уделяется значительно меньше внимания. Ввиду того что композитные материалы для эластичных резервуаров являются горючими, экспериментальное исследование процесса их термодеструкции, в частности методом термического анализа, является актуальной задачей.

Цель и задачи. Целью исследования являлась оценка пожарной опасности эластичных резервуаров на основе термогравиметрического анализа трех образцов композитных материалов, которые нашли широкое применение при изготовлении эластичных резервуаров для хранения пожароопасных жидкостей. В работе проведен анализ результатов синхронного термического анализа схожих по своей структуре композитных материалов, а также температур поверхностного слоя при горении нефти и нефтепродуктов; определены интервалы термической деструкции, скорости потери массы, тепловые эффекты термоокислительной деструкции в азотно-кислородной среде исследуемых материалов.

Материалы и методы. Для оценки термостойкости полимерных композитных материалов, применяемых при изготовлении мягких резервуаров хранения пожароопасных жидкостей, были изучены физико-механические свойства следующих марок материалов: Yan Yang YY1600; Jinlong JL1600; L3690 NESU. Методом синхронного термического анализа (ТГА+ДСК) с использованием прибора Setsys Evolution 16 исследована термическая деструкция данных материалов в азотно-кислородной атмосфере.

Результаты исследования. Проведенные эксперименты позволили установить, что термодеструкция исследуемых материалов наступает при температурах 280–290 °С, что близко к температуре поверхностного слоя при горении темных нефтепродуктов. Максимальная скорость деструкции у всех образцов наблюдалась при 410–420 °С, а максимальный коксовый остаток не превышал 4,5 %. Время полного разрушения исследуемых материалов при максимальной скорости убыли массы составило от 9 до 14 мин в зависимости от вида образца.

Выводы. Температура начала термодеструкции трех исследуемых марок полимерных композитных материалов близка к температуре поверхностного слоя при горении высококипящих жидкостей, что создает опасность разгерметизации при воспламенении пролива темных нефтепродуктов на поверхности исследуемых материалов.

Ключевые слова: эластичный композитный материал; пожарная опасность; нефть; нефтепродукт; экспериментальная установка; термодеструкция

Для цитирования: Ширяев Е.В., Шабунин С.А., Швырков С.А. Оценка пожарной опасности эластичных резервуаров на основе термогравиметрического анализа материала // Пожаровзрывобезопасность/Fire and Explosion Safety. 2024. Т. 33. № 3. С. 37–46. DOI: 10.22227/0869-7493.2024.33.03.37-46

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

Fire hazard assessment of elastic tanks based on thermogravimetric analysis

Evgeniy V. Shiryayev¹✉, Sergey A. Shabunin², Sergey A. Shvyrkov¹

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 Ivanovo Fire and Rescue Academy of the State Fire Service of the Ministry of the Russian Federation for Civil Defense, Emergencies and Elimination on Consequences of Natural Disasters, Ivanovo, Russian Federation

ABSTRACT

Introduction. Every year, new types of polymer composite materials appear, which are used for the manufacture of quickly erected soft tanks. These materials are tested for mechanical and chemical resistance, while much less attention is paid to the study of their fire-hazardous properties. Due to the fact that composite materials for elastic tanks are combustible, the experimental study of the process of their thermal destruction process, in particular by the method of thermal analysis, is an urgent task.

Purpose and objectives. The aim of the study was to assess the fire hazard of elastic tanks based on thermogravimetric analysis of three specimens of composite materials, which are widely used in the manufacture of elastic tanks for the storage of flammable liquids. The paper analyzes the results of synchronous thermal analysis of composite materials similar in structure, as well as surface layer temperatures during burning of oil and petroleum products; the intervals of thermal destruction, mass loss rates, and thermal effects of thermo-oxidative destruction in the nitrogen-oxygen environment of the studied materials are determined.

Materials and methods. To assess the thermal resistance of polymer composite materials used in the manufacture of soft storage tanks for flammable liquids, the physical and mechanical properties of the following material grades were studied: Yan Yang YY1600; Jinlong JL1600; L3690 NESU. Thermal destruction of these materials in nitrogen-oxygen atmosphere was studied by the method of synchronous thermal analysis (TGA+DSC) using Setsys Evolution 16 device.

Results of the study. The experiments carried out made it possible to establish that thermal destruction of the materials under study occurs at temperatures of 280–290 °C, which is close to the temperature of the surface layer during combustion of dark petroleum products. The maximum rate of destruction in all specimens was observed at 410–420 °C, and the maximum coke residue did not exceed 4.5 %. The time of complete destruction of the studied materials at the maximum rate of mass loss ranged from 9 to 14 minutes, depending on the type of specimen.

Conclusions. The temperature of the beginning of thermal destruction of the three grades of polymer composite materials under study is close to the temperature of the surface layer during the combustion of high-boiling liquids, which creates danger of depressurization during ignition of a spill of dark petroleum products on the surface of the materials under study.

Keywords: elastic composite material; fire hazard; oil; petroleum product; experimental installation; thermal destruction

For citation: Shiryayev E.V., Shabunin S.A., Shvyrkov S.A. Fire hazard assessment of elastic tanks based on thermogravimetric analysis. *Pozharovzryvobezopasnost/Fire and Explosion Safety*. 2024; 33(3):37-46. DOI: 10.22227/0869-7493.2024.33.03.37-46 (rus).

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

Введение

Эластичные (мягкие, резиноканевые) резервуары для хранения различных видов горючих жидкостей, в том числе нефти и нефтепродуктов, нашли широкое применение в различных отраслях промышленности как в России, так и за рубежом [1, 2]. Небольшие быстровозводимые склады для хранения горючих жидкостей необходимы в первую очередь в местах освоения новых месторождений полезных ископаемых на труднодоступных территориях, где требуется работа тяжелой техники, например в арктической зоне и удаленных от развитой инфраструктуры территорий [3]. Резиноканевые резервуары также широко применяются для сбора и временного хранения нефти и нефтепродуктов при ликвидации аварийных разливов как в водной акватории, так и на грунте [4].

Современный рынок полимерных композитных материалов, которые возможно использовать для хранения нефти и нефтепродуктов, достаточно большой. Наиболее крупными отечественными производителями мягких резервуаров являются НПФ «Политехника» (politechnika.ru) и группа компаний «Нефтетанк» (neftetank.ru). Международные компании, например Markleen (markleen.com)

и OPECsystems (opceansystems.com), специализируются на производстве эластичных резервуаров, боновых заграждений и комплектующих для локализации и ликвидации крупномасштабных аварийных разливов нефти в океане и прибрежной территории.

С появлением и применением новых видов полимерных композиционных материалов современные эластичные резервуары обладают высокой морозостойкостью (до минус 70 °C) и имеют относительно небольшой вес, что позволяет их без особых затруднений транспортировать и использовать в различных климатических условиях (рис. 1, 2).

Основным преимуществом эластичных резервуаров является быстрота их сборки и демонтажа, а недостатком, с точки зрения пожарной безопасности, горючесть композиционных материалов. В работах [5–8] приведены методики исследования и результаты испытаний с определением физико-механических свойств эластичных композитных резиноканевых резервуаров. Однако исследованию пожароопасных свойств материалов, из которых эти резервуары изготавливаются, уделено значительно меньше внимания, что и указывает на актуальность рассматриваемой тематики, с учетом того, что резервуары часто применяются для хранения



Рис. 1. Склад нефтепродуктов в арктической зоне
Fig. 1. Petroleum products warehouse in the Arctic zone

горючих жидкостей [9]. Для оценки угрозы развития пожара при воспламенении локальных проливов нефти и нефтепродуктов на поверхности эластичных резервуаров необходимо: провести анализ результатов синхронного термического анализа схожих по своей структуре композитных материалов, температуры поверхностного слоя при горении нефти и нефтепродуктов; определить интервалы термической деструкции, скорости потери массы, тепловые эффекты термоокислительной деструкции в азотно-кислородной среде исследуемых материалов.

Предпосылки проведения экспериментальных исследований

Повышение термостойкости и прочности на растяжение эластичных армированных полимеров достигается за счет применения различных наполнителей: модифицированных кремнеземов, цеолитов, полиэфирных олигомерных силесквиоксанов (POSS), нанотрубок и др. [10–14].

Для оценки пожарной опасности при размещении складов горючих жидкостей в резервуарах из полимерных композитов необходимо знать параметры термодеструкции этих материалов. Одним из наиболее точных методов оценки параметров разрушения материала под действием температуры является термогравиметрический анализ TGA [15–18]. Одной из важных величин, которая позволяет оценить пожарную опасность материала, является температура начала термодеструкции, поскольку деструкция материала будет сопровождаться выделением горючих продуктов, способных при определенных условиях воспламениться и поддерживать горение. Другим параметром, получаемым по результатам термогравиметрического анализа, является скорость убыли массы (часто обозначается как «dTg»), на графической зависимости которой характерно наличие точек экстремума, где наблюдается максимальная



Рис. 2. Эластичный резервуар близ Каспия
Fig. 2. Elastic reservoir near the Caspian Sea

скорость потери массы образцом. Соответственно, чем раньше будет начинаться термодеструкция материала, тем раньше создадутся условия, необходимые для его горения, и тем быстрее будут ухудшаться физико-механические свойства данного материала, что может привести к нарушению его целостности и разрушению.

Изменение физических свойств исследуемых материалов при повышении температуры воздействия на них позволяет не только охарактеризовать процесс термоокислительной деструкции материала, но и определить их зависимость от температуры воздействия, что важно для оценки степени термического воздействия на исследуемый материал [19].

В работе [14] приведены результаты выполненного синхронного термического анализа, основанного на термогравиметрическом и дифференциально-термогравиметрическом методах, который показал, что термоокислительная деструкция испытуемых эластичных материалов марок Rema TIP-TOP Solution MTR начинается при температуре около 340 °С, при этом материал, модифицированный астраленом (10 % масс.), сохранил 25–30 % исходной массы.

Известно, что температура пламени при горении нефти и нефтепродуктов превышает 1000 °С, а температура поверхностного слоя жидкости близка к температуре ее кипения и определяются в зависимости от разгонки топлива [20]. Так, например, при горении бензина температура его поверхностного слоя находится в диапазоне от 90 до 110 °С, керосина — от 170 до 220 °С, дизельного топлива — от 230 до 240 °С, солярового масла — от 280 до 340 °С, нефти — от 130 до 350 °С, мазута — от 350 до 430 °С [21–23]. Таким образом, для оценки возможности воспламенения эластичных композитных резиноканевых резервуаров при проливе пожароопасной жидкости (нефти, нефтепродуктов) важно знать параметры термической деструкции материала.

Исходные данные, экспериментальная установка и методика проведения экспериментов

Исследование параметров термической деструкции проводилось на трех образцах полимерных композиционных материалов, марки которых наиболее часто используются в конструкциях эластичных резервуаров: Yan Yang YY1600¹; Jinlong JL1600²; L3690 NESU³ (производство — Китай). Резервуары на основе представленных материалов нашли применение для хранения нефти и нефтепродуктов в России, Китае, Новой Зеландии и Австралии. В табл. 1 представлены общий вид и свойства исследуемых образцов.

Термодеструкция образцов изучалась на термическом анализаторе марки Setsys Evolution 16 (Setaram, Франция) с использованием ДСК-датчика S-типа Pt/PtRh (10 %) общий вид которого показан на рис. 3.



Рис. 3. Общий вид термического анализатора марки Setsys Evolution 16

Fig. 3. General view of the Setsys Evolution 16 thermal analyzer

Таблица 1. Общий вид и свойства образцов материалов

Table 1. General appearance and properties of material specimens

Параметр Parameter	Виды исследуемых образцов композитных материалов Types of studied specimens of composite materials		
Название материала Name of the material	YAN YANG YY1600	JINLONG JL1600	L3690 NESU
Фото поперечного сечения материала Photo of the cross section of the material			
Фото наружной поверхности Photo of the outer surface			
Плотность материала, г/м ² Material density, g/m ²	1600	1178	1224
Температурная область применения, °C Temperature range of application, °C	От минус 50 до 120 From minus 50 to 120	От минус 50 до 130 From minus 50 to 130	От минус 40 до 82 From minus 40 to 82
Толщина материала, мм Material thickness, mm	1,35	1,02	1,10

¹ Yan Yang YY1600 : технический сертификат. URL: https://www.politechnika.ru/catalog/k-11494606-myagkiye_rezervuary (дата обращения: 17.03.2024).

² Jinlong JL1600 : технический сертификат. URL: https://www.politechnika.ru/catalog/k-11494606-myagkiye_rezervuary (дата обращения: 17.03.2024).

³ L3690 NESU : технический сертификат. URL: https://www.politechnika.ru/catalog/k-11494606-myagkiye_rezervuary (дата обращения: 17.03.2024).

Скорость нагрева образца составляла 10 °С/мин. Газовая среда создавалась смешением азота⁴ и кислорода⁵.

Расход газа составлял 50 мкл/мин. Навеску образца массой ≈ 12 мг помещали в тигель из оксида алюминия. Диапазон температурных измерений составлял от 50 до 1000 °С.

Результаты экспериментов и их обсуждение

По результатам выполненных экспериментов в азотно-кислородной (21 %) среде получены ТГ- и ДСК-кривые исследуемых образцов материалов, общий вид которых представлен на рис. 4–6.

При анализе полученных данных видно, что для всех рассматриваемых образцов эластичных

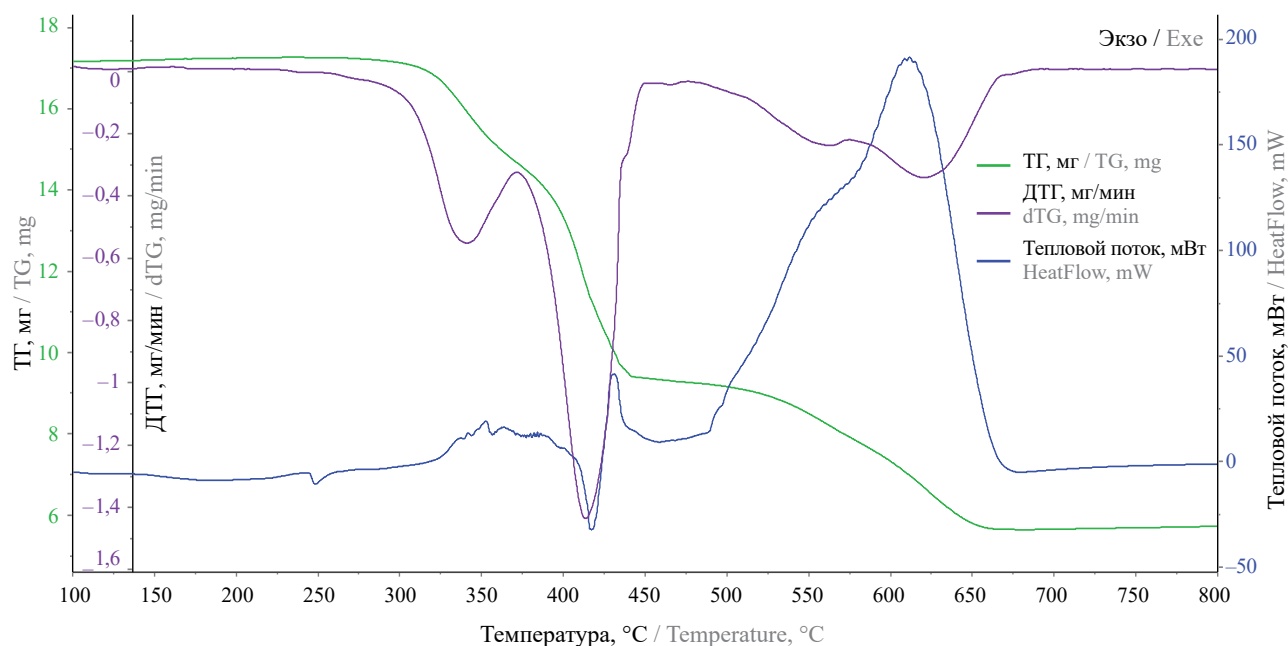


Рис. 4. График зависимости потери массы образца материала марки Yan Yang YY1600 от температурного нагрева
Fig. 4. Graph of dependence of mass loss of Yan Yang YY1600 material specimen on temperature heating

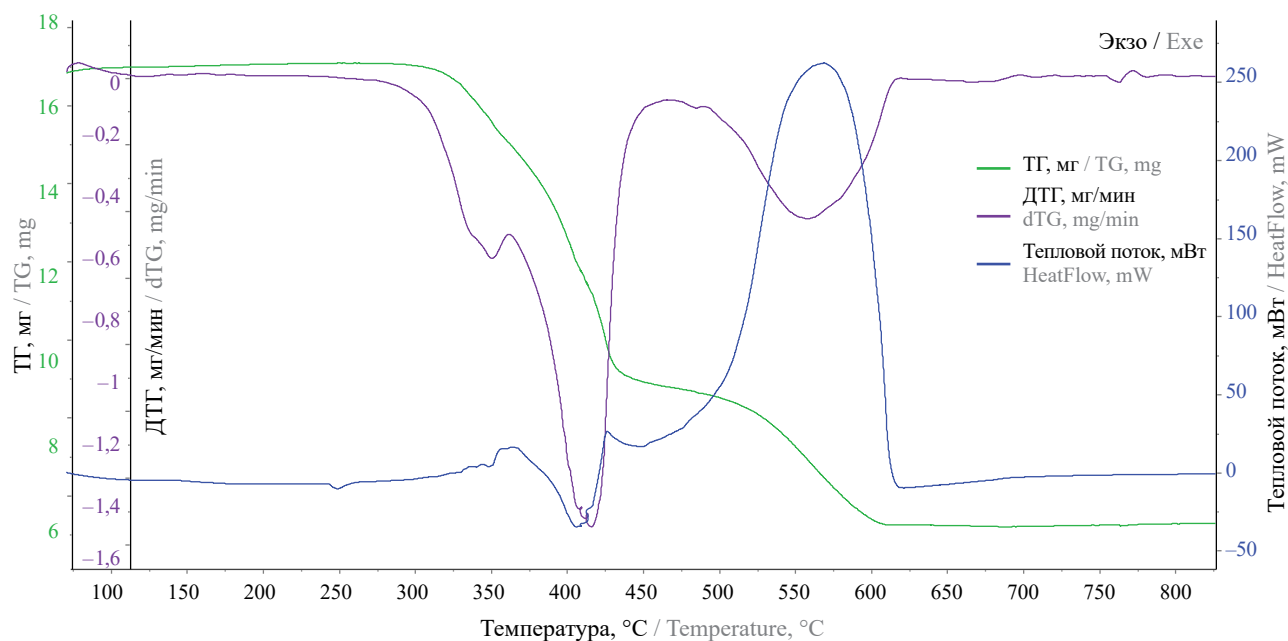


Рис. 5. График зависимости потери массы образца материала марки Jinlong JL1600 от температурного нагрева
Fig. 5. Graph of dependence of mass loss of Jinlong JL1600 material specimen on temperature heating

⁴ ОСЧ ГОСТ 9293–74 ИСО 2435–73. Азот газообразный и жидкий. Технические условия.

⁵ ГОСТ 5583–78. Кислород газообразный технический и медицинский. Технические условия.

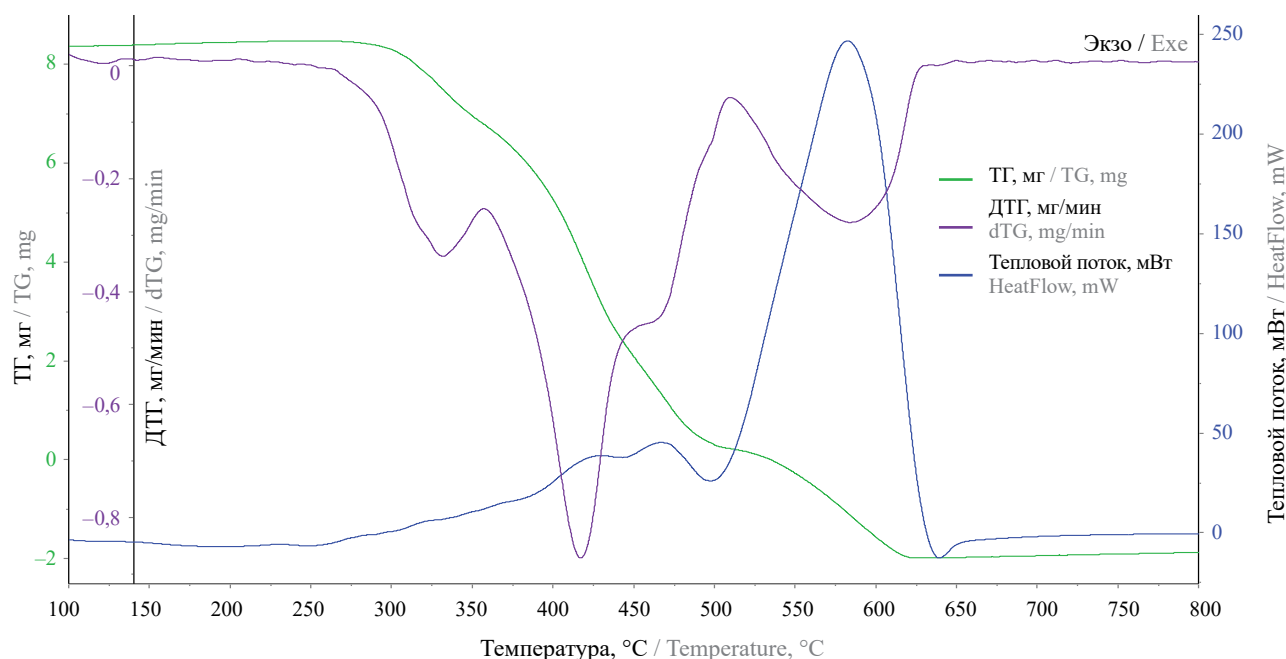


Рис. 6. График зависимости потери массы образца материала марки L3690 NESU от температурного нагрева
Fig. 6. Graph of dependence of mass loss of L3690 NESU material specimen on temperature heating

композитных материалов процесс термоокислительной деструкции имеет схожий характер, при этом время начала термодеструкции практически совпадает (± 5 с). На каждой термогравиметрической кривой отчетливо прослеживаются три участка, причем диапазон первого из них для всех образцов также практически совпадает. Окончание термодеструкции происходит в диапазоне температур от 600 до 700 °C, при этом для образцов из материалов марок Jinlong JL1600 и L3690 NESU температура примерно одинакова, а для YY1600 составляет 670 °C. Термоокислительная деструкция имеет экзотермический характер (табл. 2).

Максимальная скорость деструкции у всех образцов наблюдалась при 410–420 °C, а максимальный коксовый остаток не превышал 4,5 %.

В табл. 3 представлены положения максимумов на кривой dTg, которая отражает скорость потери массы. Положения первого и второго максимумов у всех исследованных материалов практически совпадают. Характерно, что максимальная скорость деструкции наблюдается для всех материалов в области от 410 до 420 °C. На температурный интервал 360–470 °C приходится наибольшая потеря массы для каждого образца, и, как следствие, убыль массы достигает 65–70 % к 500 °C.

Характеристики пиков на кривой ДСК (тепловой поток) (см. рис. 4–6) представлены в табл. 4. Экзотермический характер термодеструкции проявляется в следующих интервалах температур: для JL1600 444–623 °C, YY1600 — 425–680 °C, в то время как для L3690 NESU — в интервале температур 258–640 °C. В кривых ДСК (тепловой поток) YY1600

Таблица 2. Интервалы термической деструкции исследуемых материалов
Table 2. Intervals of thermal destruction of the studied materials

Порядок пиковых значений The order of the peak values	Виды исследуемых образцов композитных материалов Types of studied specimens of composite materials		
	Yan Yang YY1600	Jinlong JL1600	L3690 NESU
1 интервал, °C / % потери массы 1 interval, °C / % mass loss	280–363/19,4	290–362/16,9	280–357/15,2
2 интервал °C / % потери массы 2 interval, °C / % mass loss	363–468/46,3	362–467/51,0	358–508/60,1
3 интервал °C / % потери массы 3 interval, °C / % mass loss	468–670/31,1	468–610/29,0	508–622/20,2
Общий интервал термической деструкции, °C The total interval of thermal destruction, °C	290–670	290–610	280–622
Коксовый остаток, % Coke residue, %	3,2	3,1	4,5

Таблица 3. Положение максимумов на кривых dTg
Table 3. Position of maxima on dTg curves

Порядок пиковых значений The order of the peak values	Виды исследуемых образцов композитных материалов Types of studied specimens of composite materials		
	Yan Yang YY1600	Jinlong JL1600	L3690 NESU
1 максимум 1 maximum	341 °C/–0,55 мг/мин 341 °C/–0.55 mg/min	350 °C/–0,54 мг/мин 350 °C/–0.54 mg/min	332 °C/–0,34 мг/мин 332 °C/–0.34 mg/min
2 максимум 2 maximum	413 °C/–1,43 мг/мин 413 °C/–1.43 mg/min	416 °C/–1,34 мг/мин 416 °C/–1.34 mg/min	418 °C/–0,87 мг/мин 418 °C/–0.87 mg/min
3 максимум 3 maximum	620 °C/–0,34 мг/мин 620 °C/–0.34 mg/min	558 °C/–0,42 мг/мин 558 °C/–0.42 mg/min	583 °C/–0,28 мг/мин 583 °C/–0.28 mg/min

Таблица 4. Характеристики пиков на кривой ДСК
Table 4. Characteristics of peaks in the DSC curve

Порядок пиковых значений The order of the peak values	Виды исследуемых образцов композитных материалов Types of studied specimens of composite materials		
	Yan Yang YY1600	Jinlong JL1600	L3690 NESU
1 интервал, °C / тепловой эффект, Дж/г 1 interval, °C / thermal effect, J/g	385–425/228	362–426/702	258–499/–1200
2 интервал, °C / тепловой эффект, Дж/г 2 interval, °C / thermal effect, J/g	425–460/–175	444–623/–10 600	499–640/–9620
3 интервал, °C / тепловой эффект, Дж/г 3 interval, °C / thermal effect, J/g	460–680/–9086	–	–

и JL1600 пик с эндотермическим тепловым эффектом находится практически на одном интервале.

На основании паспортных данных на исследуемые материалы можно оценить, что 1 мм² весит от 1,2 до 1,6 мг. Учитывая небольшую толщину (1,02–1,30 мм) и данные термогравиметрического анализа, можно утверждать, что горение нефтепродукта в непосредственной близости от резервуара приведет к быстрому разрушению его эластичной оболочки. Так, при температуре материала резервуара 340 °C с учетом значения dTg из табл. 3 разрушение его оболочки произойдет в течение всего нескольких минут.

Выводы

В результате выполненных экспериментов установлено, что термодеструкция исследуемых материалов наступает при температуре 280–290 °C, что ниже температуры поверхностного слоя при горении темных нефтепродуктов (нефть, соляровое масло, мазут). При дальнейшем повышении температуры процесс разрушения оболочки резервуара будет ускоряться за счет выделяющейся энергии в результате термоокислительной деструкции материала,

при этом максимальная скорость деструкции у всех образцов достигается при температуре 410–420 °C.

Время полного разрушения исследуемых материалов при максимальной скорости убыли массы составило от 9 до 14 мин в зависимости от вида образца: для JL1600 ~ 9 мин; для YY 1600 ~ 11 мин; для L3690 NESU ~ 14 мин. Таким образом, подтверждается возможность разгерметизации от температуры нагрева поверхностного слоя при горении пролива высококипящих жидкостей на поверхности эластичного резервуара. Дополнительные данные по времени разрушения исследуемых материалов должны быть уточнены при проведении крупномасштабных испытаний в заполненных горючей жидкостью резервуарах.

Стоит отметить, что перспективным направлением исследования пожарной опасности резервуаров из композитных эластичных материалов является экспериментальная оценка параметров термодеструкции от теплового излучения при горении пожароопасных жидкостей на поверхности резервуара и с поверхности пролива вблизи резервуара, а также влияния различных способов противопожарной защиты на снижение пожарной опасности эластичных резервуаров с горючими жидкостями.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Константинов И.В., Богачева Е.Р., Краснов Е.С. Мягкие резервуары: применение и преимущества // Инновации. Наука. Образование. 2021. № 46. URL: https://elibrary.ru/download/elibrary_47415673_72698647.pdf
2. Кургин Р.В. Мягкие резервуары. Описание и применение // Экспозиция Нефть Газ. 2014. № 6 (38). С. 80–81.

3. Попов В.А., Подугалова Ю.Ю. Возможность применения мягких резервуаров для осуществления авиатопливообеспечения воздушных перевозок в арктической зоне Российской Федерации // The scientific heritage. 2021. № 81. С. 55–58. DOI: 10.24412/9215-0365-2021-81-1-55-58
4. Контев Д.П. Норильский разлив: уроки и последствия // Бурение и нефть. 2020. № 7–8. С. 3–9.
5. Уэдлер Е.М. Совершенствование методики расчета мягких резервуаров с жидкостью // Известия КазГАСУ. 2011. № 2 (16). С. 110–115.
6. Алексеев С.А. Расчет мягких наземных емкостей для жидкостей // Сб. статей по исследованию прочности, устойчивости и выносливости авиационных конструкций : Труды Военно-воздушной Академии им. Жуковского. 1980. Вып. 1265. С. 208–216.
7. Shirieva N.S., Shiriev A.K., Tlyasheva R.R., Naumkin E.A. Study of mechanical properties and analysis of low temperatures influence on flexible tank engineering structural material behavior // Russian petroleum technology conference. 2020. DOI: 10.2118/202035-MS
8. Рыбаков Ю.Н., Дедов А.В., Кюннан Р.И., Ларионов С.В. Исследование проницаемости фторированного полиэтилена высокого давления для складов временного хранения топлива // Научно-технический журнал «Наука и технологии трубопроводного транспорта нефти и нефтепродуктов». 2021. Т. 11. № 1. С. 65–69.
9. Ruochen Yang, Faisal Khan, Eugenio Turco Neto, Riza Rusli, Jie Ji. Could pool fire alone cause a domino effect? // Reliability Engineering & System Safety. 2020. Vol. 202. DOI: 10.1016/j.res.2020.106976
10. Paul D.R., Mark J.E. Fillers for polysiloxane (“silicone”) elastomers // Progress in Polymer Science. 2010. Vol. 35. Issue 7. Pp. 893–901.
11. Fang W.Z., Zeng X.R., Lai X.J., Li H.Q., Chen W.J., Zhang Y.J. Thermal degradation mechanism of addition-cure liquid silicone rubber with urea-containing silane // Thermochimica Acta. 2015. Vol. 605. Pp. 28–36. DOI: 10.1016/j.tca.2015.02.011
12. Prahdan B., Srivastava S.K. Synergistic effect of three dimensional multi-walled carbon nanotube/graphene nanofiller in enhancing the mechanical and thermal properties of high performance silicone rubber // Indian institute of technology. 2014. Pp. 110–115. DOI: 10.1002/pi.4627
13. Kumar D., Sharma S., Kushwaha P.K. Recent progress in experimental and molecular dynamics study of carbon nanotube reinforced rubber composites : a review // Polymer-Plastics Technology and Materials. 2022. P. 34. DOI: 10.1080/25740881.2022.2084411
14. Самигуллин Г.Х., Захаров А.Е. Снижение пожарной опасности при использовании полимерных эластичных резервуаров для хранения нефти и нефтепродуктов // Проблемы управления рисками в техносфере. 2023. № 1 (65). С. 8–16.
15. Архангельский И.В., Нагановский Ю.К., Годунов И.А. и др. Термоаналитический межлабораторный эксперимент по идентификации материалов, веществ и средств огнезащиты // Пожарная безопасность. 2020. № 3 (100). С. 15–23. DOI: 10.37657/vniipo.pb.2020.63.99.001
16. Богданов И.А., Шабунин С.А., Ульева С.Н. и др. Оценка влияния температурных воздействий на пожарную опасность изоляции на основе ПВХ-диэлектриков // Современные проблемы гражданской защиты. 2022. № 4 (45). С. 64–70.
17. Preeti Moni Doley, Anthony Chun Yin Yuen, Imrana Kabir, Luzhe Liu, Cheng Wang, Timothy Bo Yuan Chen et al. Thermal hazard and smoke toxicity assessment of building polymers incorporating TGA and FTIR–Integrated cone calorimeter arrangement // Fire. 2022. No. 5 (5). P. 139. DOI: 10.3390/fire5050139
18. Кобелев А.А., Нагановский Ю.К., Круглов Е.Ю. и др. Пиролиз гибридной полиуретано-неорганической теплоизоляции: термогравиметрический анализ и Фурье ИК-спектры // Пожаровзрывобезопасность/ Fire and Explosion Safety. 2022. Т. 31. № 4. С. 5–15. DOI: 10.22227/0869-7493.2022.31.04.5-15
19. Беззапонная О.В. Изучение особенностей развития пожара с использованием метода синхронного термического анализа // Пожаровзрывобезопасность/Fire and Explosion Safety. 2022. № 31 (5). С. 26–32. DOI: 10.22227/0869-7493.2022.31.05.26-32
20. Корольченко А.Я. Процессы горения и взрыва. М. : Пожнаука, 2007. 266 с.
21. Демидов П.Г., Шандыба В.А., Щеглов П.П. Горение и свойства горючих веществ. 2-е изд., перераб. М. : Химия, 1981. 272 с.
22. Lulu Fang, Jun Fang, Yong Hu, Fengyuan Tian, Mengwen Wang, Hassan Raza Shah et al. Experimental study of coupling between the burning behaviors of fuel storage tanks and thin fuel pools // Energy. 2018. Vol. 285. DOI: 10.1016/j.energy.2023.129418
23. Zhao J., Huang H., Jomaas G., Zhong M., Yang. Experimental study of the burning behaviors of thin-layer pool fires // Combustion and Flame. 2023. Vol. 193. Pp. 327–334. DOI: 10.1016/j.energy.2023.129418

REFERENCES

1. Konstantinov I.V., Bogacheva E.R., Krasnov E.S. Soft reservoirs: application and advantages. *Innovations. Science. Education*. 2021; 46. URL: https://elibrary.ru/download/elibrary_47415673_72698647.pdf (rus).
2. Kurgin R.V. Soft reservoirs. Description and application. *Exposition Neft Gaz*. 2014; 6(38):80-81. (rus).
3. Popov V.A., Podugalova Yu.Yu. The possibility of using soft tanks for aviation fuel supply of air transportation in the Arctic zone of the Russian Federation. *The scientific heritage*. 2021; 81:55-58. DOI: 10.24412/9215-0365-2021-81-1-55-58 (rus).
4. Koptev D.P. Norilsk spill: lessons and consequences. *Drilling and oil*. 2020; 7-8:3-9. (rus).
5. Wedler E.M. Improving the methodology for calculating soft tanks with liquid. *Izvestiya KazGASU*. 2011; 2(16):110-115. (rus).
6. Alekseev S.A. Calculation of soft ground containers for liquids. *Collection of articles on the study of strength, stability and endurance of aircraft structures : Proceedings of the Air Force Academy. Zhukovsky*. 1980; 1265:208-216. (rus).
7. Shirieva N.S., Shiriev A.K., Tlyasheva R.R., Naumkin E.A. Study of mechanical properties and analysis of low temperatures influence on flexible tank engineering structural material behavior. *Russian petroleum technology conference*. 2020. DOI: 10.2118/202035-MS
8. Rybakov Yu.N., Dedov A.V., Kunnap R.I., Larionov S.V. Investigation of the permeability of high-pressure fluorinated polyethylene for temporary fuel storage warehouses. *Scientific and technical journal "Science and technology of pipeline transport of oil and petroleum products"*. 2021; 11(1):65-69. (rus).
9. Ruochen Yang, Faisal Khan, Eugenio Turco Neto, Riza Rusli, Jie Ji. Could pool fire alone cause a domino effect? *Reliability Engineering & System Safety*. 2020; 202:106976. DOI: 10.1016/j.res.2020.106976
10. Paul D.R., Mark J.E. Fillers for polysiloxane ("silicone") elastomers. *Progress in Polymer Science*. 2010; 35(7):893-901.
11. Fang W.Z., Zeng X.R., Lai X.J., Li H.Q., Chen W.J., Zhang Y.J. Thermal degradation mechanism of ad-dition-cure liquid silicone rubber with urea-contain-ing silane. *Thermochimica Acta*. 2015; 605:28-36. DOI: 10.1016/j.tca.2015.02.011
12. Prahdan B., Srivastava S.K. Synergistic effect of three dimensional multi-walled carbon nanotube/graphene nanofiller in enhancing the mechanical and thermal properties of high performance silicone rubber. *Indian institute of technology*. 2014; 110-115. DOI: 10.1002/pi.4627
13. Kumar D., Sharma S., Kushwaha P.K. Recent progress in experimental and molecular dynamics study of carbon nanotube reinforced rubber composites : a review. *Polymer-Plastics Technology and Materials*. 2022; 34. DOI: 10.1080/25740881.2022.2084411
14. Samigullin G.H., Zakharov A.E. Reducing fire danger when using polymer elastic tanks for storing oil and petroleum products. *Problems of risk management in the technosphere*. 2023; 1(65):8-16. (rus).
15. Arkhangelsky I.V., Naganovsky Yu.K., Godunov I.A. et al. Thermoanalytical interlaboratory experiment on the identification of materials, substances and means of fire protection. *Fire safety*. 2020; 3(100):15-23. DOI: 10.37657/vniipo.pb.2020.63.99.001(rus).
16. Bogdanov I.A., Shabunin S.A., Uleva S.N. et al. Assessment of the influence of temperature influences on the fire hazard of insulation based on PVC dielectrics. *Modern problems of civil protection*. 2022; 4(45):64-70. (rus).
17. Preety Moni Doley, Anthony Chun Yin Yuen, Imrana Kabir, Luzhe Liu, Cheng Wang, Timothy Bo Yuan Chen et al. Thermal hazard and smoke toxicity assessment of building polymers incorporating TGA and FTIR–Integrated cone calorimeter arrangement. *Fire*. 2022; 5(5):139. DOI: 10.3390/fire5050139
18. Kobelev A.A., Naganovsky Yu.K., Kruglov E.Yu. et al. Pyrolysis of hybrid polyurethane-inorganic thermal insulation: thermogravimetric analysis and Fourier IR spectra. *Pozharovzryvobezopasnost'/Fire and explosion safety*. 2022; 31(4):5-15. (rus).
19. Bezzaponnaya O.V. Studying the features of fire development using the method of synchronous thermal analysis. *Pozharovzryvobezopasnost'/Fire and Explosion Safety*. 2022; 31(5):26-32. DOI: 10.22227/0869-7493.2022.31.05.26-32 (rus).
20. Korolchenko A.Ya. *Gorenje i explosion processes*. Moscow, Pozhnauka, 2007; 266. (rus).
21. Demidov P.G., Shandyba V.A., Shcheglov P.P. *Burning and properties of combustible substances*. 2nd ed., reprint. Moscow, Khimiya, 1981; 272. (rus).
22. Lulu Fang, Jun Fang, Yong Hu, Fengyuan Tian, Mengwen Wang, Hassan Raza Shah et al. Experimental study of coupling between the burning behaviors of fuel storage tanks and thin fuel pools. *Energy*. 2018; 285. DOI: 10.1016/j.energy.2023.129418
23. Zhao J., Huang H., Jomaas G., Zhong M., Yang. Experimental study of the burning behaviors of thin-layer pool fires. *Combustion and Flame*. 2023; 193:327-334. DOI: 10.1016/j.energy.2023.129418

Поступила 19.03.2024, после доработки 09.04.2024;

принята к публикации 19.04.2024

Received March 19, 2024; Received in revised form April 9, 2024;

Accepted April 19, 2024

Информация об авторах

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

ШАБУНИН Сергей Александрович, научный сотрудник Научно-исследовательского отделения учебно-научного комплекса «Государственный надзор», Ивановская пожарно-спасательная академия Государственной противопожарной службы Министерства Российской Федерации по делам гражданской обороны, чрезвычайным ситуациям и ликвидации последствий стихийных бедствий, Россия, 153040, г. Иваново, пр-кт Строителей, 33; РИНЦ ID: 740493; ORCID: 0009-0000-5712-1768; e-mail: sergeyshabunin@yandex.ru

ШВЫРКОВ Сергей Александрович, д-р техн. наук, профессор кафедры пожарной безопасности технологических процессов в составе учебно-научного комплекса пожарной безопасности объектов защиты, Академия Государственной противопожарной службы Министерства Российской Федерации по делам гражданской обороны, чрезвычайным ситуациям и ликвидации последствий стихийных бедствий, Россия, 129366, г. Москва, ул. Бориса Галушкина, 4; РИНЦ ID: 479363; ORCID: 0000-0001-7449-8794; e-mail: pbtp@mail.ru

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

Information about the authors

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

Sergey A. SHABUNIN, Researcher at the Research Department of the Educational and Scientific Complex “State Supervision”, Ivanovo Fire and Rescue Academy of the State Fire Service of the Ministry of the Russian Federation for Civil Defense, Emergencies and Elimination on Consequences of Natural Disasters, Stroiteley Avenue, 33, Ivanovo, 153040, Russian Federation; ID RISC: 740493; ORCID: 0009-0000-5712-1768; e-mail: sergeyshabunin@yandex.ru

Sergey A. SHVYRKOV, Dr. Sci. (Eng.), Professor of the Department of Fire Safety of Technological Processes as part of the Educational and Scientific Complex of Fire Safety Protection Facilities, 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: 479363; ORCID: 0000-0001-7449-8794; e-mail: pbtp@mail.ru

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

Огнестойкость строительных конструкций из стального проката с повышенными показателями термостойкости

Владимир Ильич Голованов¹, Андрей Владимирович Пехотиков¹,
Дмитрий Николаевич Приступюк², Геннадий Игоревич Крючков²✉

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

² Академия Государственной противопожарной службы Министерства Российской Федерации по делам гражданской обороны, чрезвычайным ситуациям и ликвидации последствий стихийных бедствий, г. Москва, Россия

АННОТАЦИЯ

Введение. Статья посвящена экспериментальному и аналитическому исследованию несущей способности изгибаемых конструкций из обычного и огнестойкого стального проката при стандартном температурном режиме. Огневые испытания проводились с прокатными двутавровыми балками № 20Б1, изготовленными по ГОСТ Р 57837–2017 из сталей классов прочности С255, С390, и сварными двутавровыми балками 180 × 90 × 10 из сталей С355, С390, С355П, С390П длиной 3500 мм. Проведены эксперименты по определению высокотемпературных механических свойств новых марок стали.

Материалы и методы. Значения фактических пределов огнестойкости балок, полученные экспериментально, определены по ГОСТ 30247.1–94 и ГОСТ 30247.0–94. Теплотехническая часть расчета температуры в поперечном сечении стальных балок выполнена в программном комплексе ANSYS Mechanical. Расчет несущей способности проводился по разработанному методу и зарегистрированной программе для ЭВМ. Эксперименты по определению механических свойств металлопроката при высокотемпературном нагреве проводились на малогабаритных образцах в соответствии с ГОСТ 9651–84.

Результаты и их обсуждение. Экспериментально получены значения фактических пределов огнестойкости для балок двутаврового сечения из обычного и огнестойкого стального проката. Определены усредненные значения коэффициентов изменения предела текучести при повышенных температурах строительного проката, в том числе огнестойкого, которые можно использовать в расчетных моделях оценки огнестойкости стальных конструкций. Разработан программный комплекс расчета предела огнестойкости с учетом неравномерного распределения температуры в поперечном сечении конструкции. Расчетные значения пределов огнестойкости, полученные с использованием разработанной модели, коррелируют с экспериментальными данными для двутавровых балок из строительных и огнестойких сталей.

Выводы. Предел огнестойкости балок из огнестойкого стального проката С355П, С390П при стандартном температурном режиме наступает на 10–15 мин позднее, чем балок из рядового строительного проката. Результаты экспериментальных и расчетно-аналитических исследований подтвердили предположение о том, что для конструкций из огнестойких сталей время нагрева металла от начала огневого воздействия до достижения критической температуры в расчетном сечении увеличится. Это позволит обосновать их использование при проектировании зданий и сооружений в соответствии с требованиями нормативных документов по пожарной безопасности, а также способствует сокращению объемов применения огнезащитных материалов и уменьшению металлоемкости конструкций.

Ключевые слова: предел огнестойкости; стальные конструкции; предел текучести стали; несущая способность; огнестойкий металлопрокат

Для цитирования: Голованов В.И., Пехотиков А.В., Приступюк Д.Н., Крючков Г.И. Огнестойкость строительных конструкций из стального проката с повышенными показателями термостойкости // Пожаровзрывобезопасность/Fire and Explosion Safety. 2024. Т. 33. № 3. С. 47–56. DOI: 10.22227/0869-7493.2024.33.03.47-56

✉ Крючков Геннадий Игоревич, e-mail: dmuxa@bk.ru

Fire resistance of building structures made of rolled steel with increased heat resistance indicators

Vladimir I. Golovanov¹, Andrey V. Pekhotikov¹, Dmitry N. Pristupyuk², Gennadiy I. Kryuchkov²✉

¹ 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

² The State Fire Academy of the Ministry of Russian Federation for Civil Defense, Emergencies and Elimination on Consequences of Natural Disasters, Moscow, Russian Federation

ABSTRACT

Introduction. The paper is devoted to experimental and analytical study of the load-bearing capacity of bending structures made of ordinary and fire-resistant rolled steel under standard temperature conditions. Fire tests were carried out with rolled I-beams No. 20B1 manufactured according to GOST R 57837–2017 from steels of strength classes C255, C390 and welded I-beams 180 × 90 × 10 from steels C355, C390, C355P, C390P with the length of 3,500 mm. Experiments on determination of high-temperature mechanical properties of new steel grades were carried out.

Materials and methods. The values of actual fire resistance limits of beams obtained experimentally are determined according to GOST 30247.1–94 and GOST 30247.0–94. The thermotechnical part of the calculation of the temperature in the cross-section of steel beams was performed in the ANSYS Mechanical programme complex. The calculation of bearing capacity was carried out according to the developed method and the registered programme for computer. Experiments on determination of mechanical properties of rolled metal products under high-temperature heating were carried out on small-sized specimens in accordance with GOST 9651–84.

Results and discussion. Experimentally obtained values of actual fire resistance limits for I-beams made of ordinary and fire-resistant rolled steel. The averaged values of coefficients of change of yield strength at elevated temperatures of construction rolled steel, including fire-resistant steel, which can be used in calculation models of fire resistance assessment of steel structures, were determined. A programme complex for calculation of fire resistance limit taking into account non-uniform temperature distribution in the cross-section of the structure was developed. The results of calculations of fire resistance limits according to the proposed model are close to the experimental data obtained on I-beams made of building steels, including fire-resistant ones.

Conclusions. The fire resistance limit of beams made of fire-resistant rolled steel C355P, C390P at standard temperature regime occurs 10–15 minutes later than beams made of ordinary construction steel. The results of experimental and analytical studies of fire resistance limits of structures made of new types of fire-resistant steels confirm the increase in the time of metal heating from the beginning of fire exposure to the achievement of critical temperature in the design cross-section, which allows to justify their use in the design of buildings and structures in accordance with the requirements of standardized documents on fire safety, as well as to reduce the use of fireproof materials, reduce the metal intensity and cost of construction.

Keywords: fire resistance limit; steel structures; yield strength of steel; load-bearing capacity; fire-resistant rolled steel

For citation: Golovanov V.I., Pekhotikov A.V., Pristupyuk D.N., Kryuchkov G.I. Fire resistance of building structures made of rolled steel with increased heat resistance indicators. *Pozharovzryvobezopasnost/Fire and Explosion Safety*. 2024; 33(3):47–56. DOI: 10.22227/0869-7493.2024.33.03.47-56 (rus).

✉ Gennadiy Igorevich Kryuchkov, e-mail: dmuxa@bk.ru

Введение

При строительстве современных зданий и сооружений широко применяются стальные конструкции. При этом основным показателем надежности сооружения служат прочностные характеристики используемых конструкционных материалов. Однако при возникновении пожара влияние высокой температуры негативно сказывается на прочностных и деформативных свойствах стального проката. Потеря несущей способности стальных конструкций при стандартном температурном режиме может происходить через 10–15 мин после начала огневого воздействия, что может привести к прогрессирующему обрушению всего здания [1–4].

Целью исследования в данной статье является разработка математической модели расчета предела огнестойкости стальных изгибаемых стержневых конструкций при неравномерном прогреве поперечного сечения. Для достижения поставленной цели решались следующие задачи:

- разработка математической модели расчета предела огнестойкости стальных изгибаемых стержневых конструкций;
- экспериментальное определение механических свойств современного строительного металлопроката для получения исходных данных при

аналитической оценке предела огнестойкости металлоконструкций;

- проведение огневых испытаний стальных балок из обычных марок сталей для верификации математической модели.

В последние годы с увеличением количества строительных проектов и повышением требований к безопасности актуальность применения огнестойких стальных несущих конструкций значительно возросла. В результате этого исследователи и инженеры активно занимаются разработкой новых марок конструкционной стали с повышенными показателями термостойкости (огнестойкие стали). Одним из ключевых факторов, влияющих на огнестойкость стальных конструкций, является их способность сохранять несущую способность при высоких температурах. Ведущие металлургические предприятия, занимающиеся производством стали для строительных конструкций, приступили к разработке огнестойкого проката, способного сохранять свои прочностные свойства при более высоких температурах, чем у обычных строительных сталей [5–7]. Концентрация углерода в сплавах строго контролируется на уровне не более 0,1 %, что является критическим для поддержания минимизации утраты механических свойств при термической нагрузке. Элементы легирования, такие как ниобий и молибден, играют ведущую роль: микроструктурные фазы

Nb (C, N) являются ключевыми для сохранения огнестойкости, а молибден, активируясь на границах карбонитридов при температурном воздействии, противодействует их слиянию, тем самым усиливая огнестойкость материала. Введение ванадия в микролегировании приводит к образованию дополнительных дисперсных фаз карбонитридов ванадия, увеличивающих термостойкость сплава в диапазоне температур 570–620 °С. Ограничение содержания марганца до 1 % обусловлено необходимостью предотвращения снижения прочностных характеристик сплава при высоких температурах [8–11].

Материалы, оборудование и методика проведения исследований

При оценке огнестойкости стержневых стальных конструкций принимается допущение, что сталь обладает огромным коэффициентом температуропроводности, из-за чего температура по всему поперечному сечению элемента конструкции считается одинаковой в каждый момент времени нагрева. Для колонн и ферм, которые обогреваются с четырех сторон при стандартном температурном режиме пожара, это допущение вполне приемлемо. Однако балки междуэтажных перекрытий и некоторые другие несущие конструкции при пожаре обогреваются с трех сторон, что приводит к неравномерному прогреву их поперечного сечения [5, 12, 13]. Эксперименты по определению пределов огнестойкости балок из стального проката показали разницу в 150 °С между нижней и верхней полками двутаврового сечения в момент потери несущей способности.

Для сравнения температурных полей в поперечном сечении проводился расчет прогрева в программном комплексе Ansys Mechanical при двух вариантах обогрева балки. Как видно из рис. 1, результаты расчета температурных полей в поперечном сечении балки на 20-й минуте огневого воздействия по стандартному температурному режиму при 3- и 4-стороннем обогреве поперечного сечения двутавровой балки имеют отличия. Градиент температуры между верхней и нижней полками балки при 3-стороннем обогреве достигает 156 °С и соответствует эксперименту. При обогреве балки с 4 сторон температура нижней и верхней полок имеет одинаковые значения.

Оценка огнестойкости по методике А.И. Яковлева [14] основана на определении времени нагрева нижней полки стальной балки до критической температуры по формуле:

$$\gamma_t = \frac{M_n}{R_{yn} \cdot W_{пл}}, \quad (1)$$

где γ_t — температурный коэффициент снижения предела текучести стали;

$W_{пл}$ — пластический момент сопротивления сечения, м³.

Очевидно, что расчет пределов огнестойкости изгибаемых стальных конструкций, обогреваемых при стандартном пожаре с трех сторон, по критической температуре нижней полки приводит к заниженным показателям фактического предела огнестойкости, что, в свою очередь, влияет на увеличение стоимости строительства.

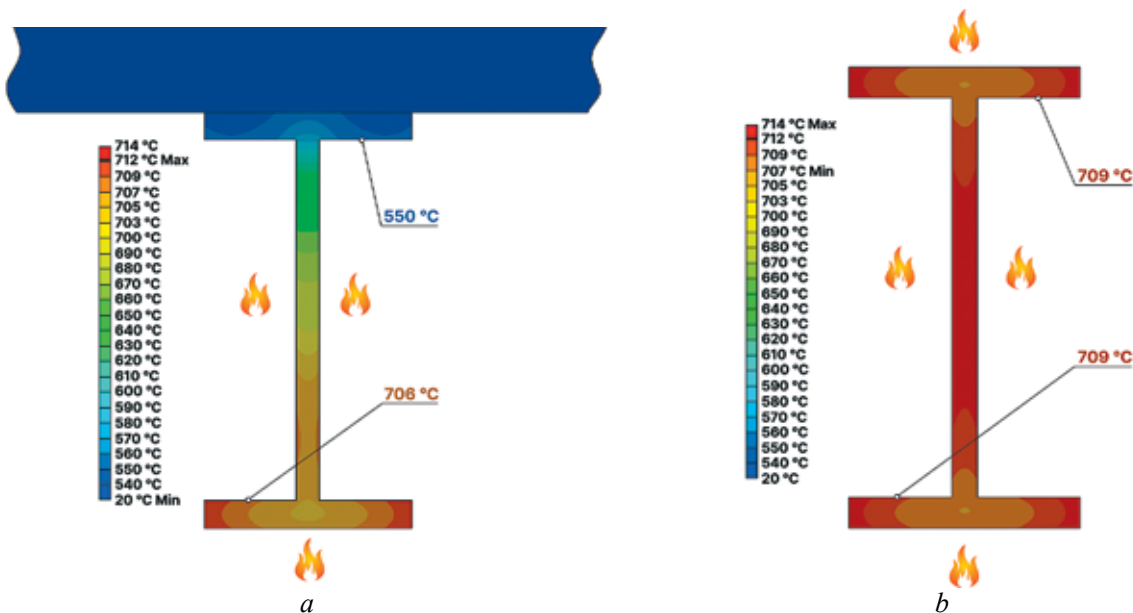


Рис. 1. Температурные поля стальной балки на 20 мин при численном моделировании: *a* — 3-сторонний обогрев; *b* — 4-сторонний обогрев

Fig. 1. Temperature fields of a steel beam at 20 min in numerical simulation: *a* — 3-sided heating; *b* — 4-sided heating

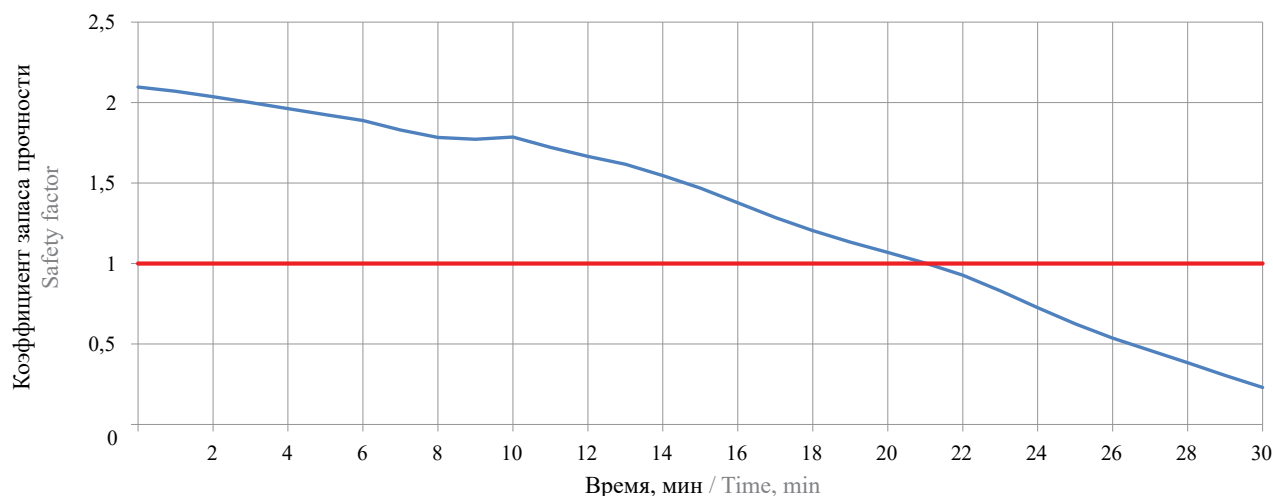


Рис. 2. Схема расчета предела огнестойкости балки из стального проката класса прочности С355П с нормативной нагрузкой $M_n = 48,8$ кНм по разработанной программе для ЭВМ

Fig. 2. Scheme of calculation of fire resistance limit of a beam made of rolled steel of strength class C355P with normative load $M_n = 48.8$ kNm by the developed programme for the computer

В целях совершенствования метода расчета пределов огнестойкости балок предложен подход, учитывающий неравномерный прогрев поперечного сечения. Расчет огнестойкости стальных балок при трехстороннем обогреве с учетом неравномерного прогрева поперечного сечения балок соответствует рекомендациям EN 1993-1-2¹. Неоднородность температурного поля обуславливает отличие в значениях нормативного сопротивления стали на отдельных элементарных участках поперечного сечения, что может привести к значительным погрешностям при расчете предела огнестойкости.

Предлагаемый метод расчета огнестойкости стальных неравномерно нагретых изгибаемых элементов производится в результате определения несущей способности наиболее напряженного поперечного сечения конструкции с учетом длительности воздействия стандартного режима пожара. Расчетное сечение разбивается на малые участки с близкими по значению показателями температуры. Для каждого участка, в зависимости от температуры стали, принимают свой коэффициент условий работы на растяжение γ_t .

В результате расчетов строится график снижения ее несущей способности во времени. По этому графику определяют предел огнестойкости, т.е. время нагревания, по истечении которого несущая способность конструкции $M_{p,t}$ снизится до величины нормативной нагрузки M_n , т.е. когда будет иметь место равенство: $M_{p,t} = M_n$. Затем определяют положение нейтральной оси, которая разделяет сечение на растянутую и сжатую зоны. Несущая способность поперечного сечения определяется как сумма моментов всех малых участков. В расчетах значение температуры в процессе

нагрева стали принимали по результатам огневых испытаний. Термопары, которые фиксировали изменение температуры, были установлены в трех точках поперечного двутаврового сечения: на верхней полке, в середине стенки и на нижней полке. Таким образом, несущую способность балки двутаврового сечения предлагается рассчитывать по формуле:

$$M_{p,t} = \sum_{i=1}^n A_i \cdot Z_i \cdot R_{yn} \cdot \gamma_{ti}, \quad (2)$$

где A_i — элементарная площадь поперечного сечения с температурой t_i ;

Z_i — расстояние от нейтральной оси сечения до центра тяжести элементарной площадки A_i с температурой t_i ;

R_{yn} — предел текучести стали при температуре 20 °C;

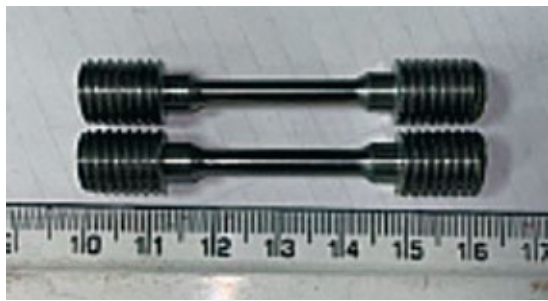
γ_{ti} — коэффициент снижения предела текучести стали при растяжении и сжатии и температуре t_i .

Предложенный метод расчета предела огнестойкости с учетом неравномерного распределения температуры в поперечном сечении конструкции реализован в форме программного комплекса². Схема расчета по разработанной программе для ЭВМ балки из стального проката класса прочности С355П с нормативной нагрузкой $M_n = 48,8$ кНм при стандартном температурном режиме представлена на рис. 2.

Основным параметром для оценки огнестойкости изгибаемых стержневых конструкций при огневом воздействии является предел текучести,

¹ EN 1993-1-2. Проектирование стальных конструкций. Часть 1-2. Общие правила определения огнестойкости.

² Свидетельство № RU 2023610664 о государственной регистрации программы для ЭВМ. Программа для расчета предела огнестойкости с учетом неравномерного распределения температуры в поперечном сечении конструкции / Г.И. Крючков, В.И. Голованов, Н.С. Новиков; заявл. 28.02.2022; опубл. 12.01.2023.



a



b

Рис. 3. Внешний вид образцов из металлопроката С390П на растяжение при нагреве: *a* — до испытания на растяжение при нагреве; *b* — после испытания на растяжение

Fig. 3. Appearance of C390P rolled metal specimens in tensile test under heating: *a* — before the heating tensile test; *b* — after the tensile test

поскольку именно он определяет начало и интенсивность пластической деформации строительных металлоконструкций, сопровождающейся их разрушением в условиях пожара [4]. В отечественной и зарубежной литературе в качестве основного показателя для перевода обычного строительного проката в разряд «огнестойкий» принят критерий, который соответствует значению коэффициента снижения предела текучести $\gamma_t \geq 0,6$ при температуре 600 °С [15, 16]. Таким образом, у огнестойких сталей предел текучести при нагреве до 600 °С не должен снижаться более чем 40 % от значения их нормативного сопротивления при 20 °С [17–19].

Анализ прочностных и деформативных характеристик новых марок стали при повышенных температурах стоит в ряду приоритетных научных задач, ввиду того что эти новые виды огнестойкой конструкционной стали обладают уникальными характеристиками, позволяющими им сохранять несущую способность конструкций в течение более длительного периода времени при высоких температурах [20]. В рамках решения второй задачи были проведены эксперименты в соответствии с ГОСТ 9651–84³ на цилиндрических образцах

с резьбой М10 на головках и рабочим диаметром 4 мм. Методика определения высокотемпературных механических свойств проката предусматривала нагрев образцов до заданной температуры испытания и проведение испытания на одноосное растяжение в гидравлической разрывной машине. Испытания образцов проводились при температуре от 20 до 700 °С (для огнестойких сталей до 850 °С) с шагом 50–100 °С. Внешний вид малогабаритных образцов до и после испытаний на растяжение при нагреве представлен на рис. 3.

Малогабаритные образцы, испытываемые на растяжение, изготовлены из стали классов обычной прочности С255, повышенной прочности С355, а также высокой прочности — С390. Отдельно выделен подкласс — огнестойкий прокат, к которому относятся стали С355П и С390П. Образцы изготавливались после их вырезки из серии сварных и прокатных балок, предназначенных для огневых испытаний [5].

С учетом влияния на прочностные характеристики отклонения в свойствах и составе сталей коэффициенты изменения предела текучести при повышенных температурах в проведенных исследованиях приняты по усредненным значениям отдельно для обычных и огнестойких сталей. Как видно из рис. 4, по мере нагрева предел текучести огнестойкого проката снижается менее интенсивно, чем у обычных сталей такого же класса прочности, и характеризуется наиболее высокими значениями данного параметра.

Применение регрессионного анализа к экспериментальным данным позволило вывести эмпирические зависимости, отражающие взаимосвязь температурных условий испытаний с прочностными показателями строительного металлопроката [7].

Изменение коэффициента снижения предела текучести от температуры для обычных строительных сталей предлагается определять по зависимости:

- в диапазоне 20 °С < t < 400 °С $\gamma_m = -0,0007 \cdot t + 1,0147$;
- в диапазоне 400 °С < t < 700 °С $\gamma_m = 5 \cdot 10^{-9} \cdot t^3 - 1 \cdot 10^{-5} \cdot t^2 + 0,0058 \cdot t - 0,1535$.

Изменение коэффициента снижения предела текучести от температуры для огнестойких сталей предлагается определять по зависимости:

- в диапазоне 20 °С < t < 400 °С $\gamma_m = -0,0005 \cdot t + 1,0147$;
- в диапазоне 400 °С < t < 850 °С $\gamma_m = 1 \cdot 10^{-8} \cdot t^3 - 3 \cdot 10^{-5} \cdot t^2 + 0,0018 \cdot t - 2,5075$.

В ходе реализации третьего исследовательского вопроса проведен комплекс испытаний крупногабаритных образцов (балок) по определению фактических пределов огнестойкости. Основными целями исследований являются сопоставление результатов

³ ГОСТ 9651–84. Металлы. Методы испытаний на растяжение при повышенных температурах.

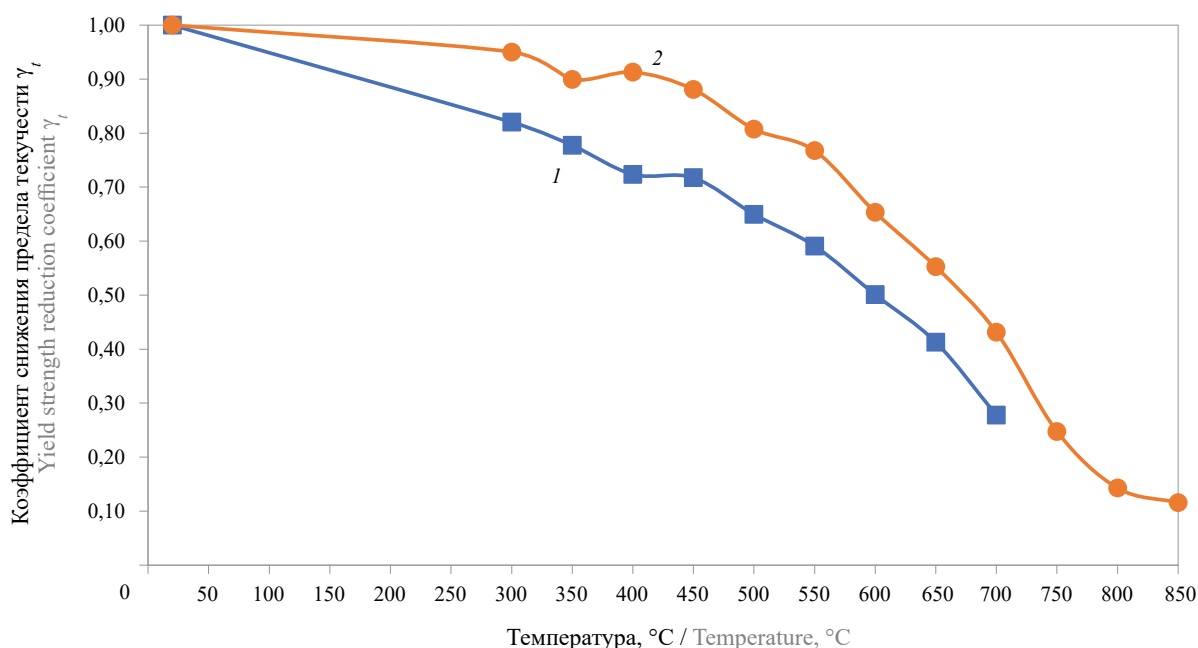


Рис. 4. Изменение коэффициента снижения предела текучести при повышенных температурах испытания: 1 — обычный строительный прокат стали; 2 — огнестойкий прокат стали

Fig. 4. Change of yield strength reduction coefficient at elevated test temperatures: 1 — ordinary construction rolled steel; 2 — fire-resistant rolled steel

испытаний образцов, изготовленных из обычного и огнестойкого строительного проката, а также оценка сходимости результатов определения пределов огнестойкости стальных конструкций расчетно-аналитическим методом.

Огневые испытания по определению фактических пределов огнестойкости металлоконструкций проведены на экспериментальной базе ФГБУ ВНИИПО МЧС России. Огневые испытания проводились с прокатными двутавровыми балками № 20Б1, изготовленными по ГОСТ Р 57837–2017⁴ из сталей классов прочности С255, С390, и сварными двутавровыми балками 180 × 90 × 10 из сталей С355, С390, С355П, С390П длиной 3500 мм. Огневому воздействию снизу с трех сторон подвергались шарнирно опертые балки, нагруженные сосредоточенной нагрузкой в середине пролета расчетной длиной 3200 мм. Верхнюю полку защитили от воздействия огня плитами из минеральной ваты толщиной 300 мм.

Оценка огнестойкости осуществлялась на основе серии экспериментов, проведенных в условиях стандартного температурного режима и при различных значениях нагрузки по ГОСТ 30247.0–94⁵ и ГОСТ 30247.1–94⁶, в которых сформулированы

требования к оборудованию, размещению термопар и регистрации необходимых параметров. Как показали эксперименты, потеря несущей способности балок из исследуемого стального проката при нагреве по режиму стандартного пожара наступала в результате достижения прогиба L/20 в середине пролета [4]. На рис. 5 показана одна из балок после огневых испытаний, которая находилась в верхней части огневой камеры испытательной установки.

Экспериментальные и расчетные значения пределов огнестойкости стальных балок представлены в таблице. Анализ данных показывает, что использование метода расчета предела огнестойкости изгибаемых стальных конструкций, обогреваемых с трех сторон, при учете неравномерного прогрева поперечного сечения дает удовлетворительную схо-



Рис. 5. Балка из стального проката С390П после проведения огневых испытаний

Fig. 5. Beam made of rolled steel C390P after fire testing

димость с экспериментальными данными как для балок из обычного стального проката С255, С355, С390, так и для балок из огнестойкого проката

⁴ ГОСТ Р 57837–2017. Двутавры стальные горячекатаные с параллельными гранями полок.

⁵ ГОСТ 30247.0–94. Конструкции строительные. Методы испытаний на огнестойкость. Общие требования.

⁶ ГОСТ 30247.1–94. Конструкции строительные. Методы испытаний на огнестойкость. Несущие и ограждающие конструкции.

Сравнение теоретических и экспериментальных результатов расчета балок на огнестойкость из обычного и огнестойкого стального проката

Comparison of theoretical and experimental results of calculation of beams for fire resistance made of ordinary and fire-resistant rolled steel products

Номер опытного образца Prototype number	Тип сечения, размеры, мм Section type, dimensions, mm	Класс прочности стального проката Strength class of rolled steel	Предел текучести стали R_{ym} , МПа Yield strength of steel R_{ym} , MPa	Нагрузка, кН Load, kN	Расчетный предел огне- стойкости R , мин Rated fire resistance R , min	Эксперимен- тальный предел огнестойкости R , мин Experimental fire resistance R , min	Сравнение резуль- татов расчета и эксперименталь- ных данных, % Comparison of calculation results and experimental data, %
1	Двутавр № 20Б1 I beam No. 20b1	C255	318	15,25	21,0	15,0	28
2	Двутавр № 20Б1 I beam No. 20B1	C255	318	38,13	14,0	17,0	21
3	Двутавр 180 × 90 I beam 180 × 90	C355	409	23,08	21,5	20,0	7
4	Двутавр 180 × 90 I beam 180 × 90	C355	409	57,72	17,0	17	0
5	Двутавр 180 × 90 I beam 180 × 90	C355П	414	23,80	28,0	34,0	21
6	Двутавр 180 × 90 I beam 180 × 90	C355П	414	59,40	21,0	23,0	9
7	Двутавр № 20Б1 I beam No. 20B1	C390	390	23,80	22,0	23,0	4
8	Двутавр № 20Б1 I beam No. 20B1	C390	390	57,72	19,0	16,0	16
9	Двутавр 80 × 100 I beam 180 × 100	C390П	499	23,80	25,0	32,0	28
10	Двутавр 180 × 90 I beam 180 × 90	C390П	499	59,40	22,5	20,0	11

C355П, C390П, при различных уровнях статической нагрузки. При сравнении экспериментальных данных балок из стального огнестойкого проката C355П, C390П и балок из обычной стали C355, C390 видно, что пределы огнестойкости у первых выше на 20–40 %.

Различия между экспериментальными и расчетными значениями предела огнестойкости можно объяснить отклонениями температур в огневой камере (при испытании по ГОСТ 30247.0–94⁵ допускается отклонение от стандартного температурного режима в первые 10 мин ± 15 %), а также тем, что в поперечном сечении, в середине пролета балки, температура стали при расчете прогрева принимается одинаковой по всей длине конструкции, а в эксперименте в данном сечении происходил отток тепла в стальную опору рычажной системы нагружения.

Выводы

1. Определены усредненные коэффициенты изменения предела текучести для обычных и огнестойких сталей при повышенных температурах в диапазоне от 20 до 700 °C (для огнестойких сталей до 850 °C), необходимые для расчета строительных металлоконструкций на огнестойкость.

2. Получены экспериментальные данные о пределах огнестойкости балок из стального проката классов прочности C255, C355, C390, а также из огнестойкого проката C355П, C390П.

3. Предложен метод вычисления предела огнестойкости, учитывающий неравномерность прогрева сечения балок, который повышает точность расчетов для конструкций как из обычного стального проката, так и огнестойкого, что способствует

увеличению безопасности и устойчивости зданий при пожаре. лит уменьшить применение огнезащитных материа-

4. Использование конструкций из огнестойкого стального проката в практике строительства позво- лов, снизить металлоемкость и себестоимость стро- ительства.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Голованов В.И., Пронин Д.Г. Влияние развития нормативной базы в области огнестойкости на применение стали в строительстве // Промышленное и гражданское строительство. 2021. № 10. С. 14–29. DOI: 10.33622/0869-7019.2021.10.24-29
2. Одесский П.Д., Ведяков И.И. Сталь в строительных металлических конструкциях. М. : Metallurgizdat, 2018. 906 с.
3. Фёдоров В.С., Левитский В.Е., Молчадский И.С., Александров А.В. Огнестойкость и пожарная опасность строительных конструкций. М. : Изд-во АСВ, 2009. 408 с.
4. Голованов В.И., Пехотиков А.В., Крючков Г.И., Новиков Н.С. Огнестойкость стальных балок строительного назначения // Пожарная безопасность. 2022. № 4 (109). С. 19–28. DOI: 10.37657/vniipr.pb.2022.109.4.001
5. Голованов В.И., Пехотиков А.В., Крючков Г.И., Павлов В.В., Новиков Н.С. Особенности расчета предела огнестойкости балок из строительных сталей // Безопасность труда в промышленности. 2023. № 3. С. 7–13. DOI: 10.24000/0409-2961-2023-3-7-13
6. Корольченко Д.А., Еремина Т.Ю., Пузач С.В., Портнов Ф.А. Моделирование номограмм прогрева стальных конструкций с огнезащитными покрытиями различной толщины (на воде) // Пожаровзрывобезопасность/ Fire and Explosion Safety. 2022. Т. 31. № 6. С. 30–46. DOI: 10.22227/0869-7493.2022.31.06.30-46
7. Голованов В.И., Крючков Г.И., Стрекалев А.Н., Комиссаров А.А., Тихонов С.М. Исследование механических свойств современного металлопроката строительного назначения при повышенных температурах // Пожаровзрывобезопасность/ Fire and Explosion Safety. 2022. Т. 31. № 2. С. 52–62. DOI: 10.22227/0869-7493.2022.31.02.52-62
8. Одесский П.Д., Кулик Д.В. Стали с высоким сопротивлением экстремальным воздействиям. М. : Интермет инжиниринг, 2008. 239 с.
9. Shi Y., Wang J., Zhou X., Xue X., Li Y. Post-fire mechanical properties of Q960 cold-formed thick-walled ultra-high-strength steel // Fire Technology. 2024. No. 60. Pp. 1917–1953. DOI: 10.1007/s10694-024-01555-3
10. Su A., Wang Ya., Wang Yu., Rasmussen K.J.R., Gardner L. Behaviour and design of S960 ultra-high strength steel non-slender welded I-section beam-columns // Engineering Structures. 2024. Т. 304. С. 117602. DOI: 10.1016/j.engstruct.2024.117602
11. Komissarov A.A., Tikhonov S.M., Ten D.V., Matrosov M.Yu., Glukhov P.A. Comparative fire resistance of modern construction steels // Steel in Translation. 2021. Vol. 51. Issue 11. Pp. 827–833. DOI: 10.3103/S0967091221110073
12. Леннон Т., Мур Д.Б., Ванг Ю.К., Бейли К.Г. Руководство для проектировщиков к EN 1991-1-2, 1992-1-2, 1993-1-2 и 1994-1-2 : справочник по проектированию противопожарной защиты стальных, сталежелезобетонных и бетонных конструкций зданий и сооружений в соответствии с Еврокодами. М. : МГСУ, 2013. 195 с.
13. Ботян С.С., Жамойдик С.М., Олесиук Н.М. Анализ методов оценки огнестойкости стальных строительных конструкций с учетом влияния теплообмена с примыкающими смежными конструкциями // Вестник Университета гражданской защиты МЧС Беларуси. 2023. Т. 7. № 2. С. 131–143. DOI: 10.33408/2519-237X.2023.7-2.131
14. Яковлев А.И. Расчет огнестойкости строительных конструкций. М. : Стройиздат, 1988. 144 с.
15. Komissarov A.A., Tikhonov S.M., Ten D.V., Matrosov M.Yu., Shulga E.V. Fire resistance factors of low-alloyed construction longs // Steel in Translation. 2022. Vol. 52. Issue 7. Pp. 701–706. DOI: 10.3103/S0967091222070099
16. Комиссаров А.А., Тихонов С.М., Тен Д.В., Мазова Е.П., Матросов М.Ю., Глухов П.А. и др. Анализ использования огнестойкого проката С390П для изготовления строительных металлоконструкций // Сталь. 2022. № 12. С. 54–58.
17. Wang W.Y., Zhang L., He P. A numerical investigation on restrained high strength Q460 steel beams including creep effect // International Journal of Steel Structures. 2018. Vol. 18. Issue 1. Pp. 1497–1507. DOI: 10.1007/s13296-018-0047-9
18. Dwaikat M.M.S., Kodur V.R. A performance based methodology for fire design of restrained steel beams // Journal of Constructional Steel Research. 2011. Vol. 67. Issue 3. Pp. 510–524. DOI: 10.1016/j.jcsr.2010.09.004
19. Łukomski M., Turkowski P., Roszkowski P., Bartłomiej P. Fire resistance of unprotected steel beams — comparison between fire tests and calculation models // Procedia Engineering. 2017. Vol. 172. Pp. 665–672. DOI: 10.1016/j.proeng.2017.02.078

20. Ghafouri M., Afkhami S., Pokka A.-P., Javaheri V., Togiani A., Larkiola J. et al. Effect of temperature on the plastic flow and strain hardening of direct-quenched ultra-high strength steel S960MC // *Thin-Walled Structures*. 2024. Vol. 194. P. 111319. DOI: 10.1016/j.tws.2023.111319

REFERENCES

1. Golovanov V.I., Pronin D.G. Influence of the development of the normative base in the field of fire resistance on the use of steel in construction. *Industrial and Civil Engineering*. 2021; 10:14-29. (rus).
2. Odessky P.D., Vedyakov I.I. *Steel in building metal structures*. Moscow, Metallurgizdat Publ., 2018; 906. (rus).
3. Fedorov V.S., Levitskiy V.E., Molchadskiy I.S., Aleksandrov A.V. *Fire behavior and fire danger of building designs*. Moscow, ASV Publ., 2009; 408. (rus).
4. Golovanov V.I., Pekhotikov A.V., Kryuchkov G.I., Novikov N.S. Fire resistance of steel building beams. *Fire safety*. 2022; 4(109):19-28. DOI: 10.37657/vniipo.pb.2022.109.4.001 (rus).
5. Golovanov V.I., Pekhotikov A.V., Kryuchkov G.I., Pavlov V.V., Novikov N.S. Features of calculating the fire resistance limit of beams from construction steels. *Occupational Safety in Industry*. 2023; 3:7-13. DOI: 10.24000/0409-2961-2023-3-7-13 (rus).
6. Korolchenko D.A., Eremina T.Yu., Puzach S.V., Portnov F.A. Simulation of nomograms showing the heating of steel structures with flame retardant coatings of different thicknesses (in the water). *Pozharovzryvbezopasnost/Fire and Explosion Safety*. 2022; 31(6):30-46. DOI: 10.22227/0869-7493.2022.31.06.30-46 (rus).
7. Golovanov V.I., Kryuchkov G.I., Strekalev A.N., Komissarov A.A., Tikhonov S.M. A study on mechanical properties of modern rolled structural metal at elevated temperatures. *Pozharovzryvbezopasnost/Fire and Explosion Safety*. 2022; 31(2):52-62. DOI: 10.22227/0869-7493.2022.31.02.52-62 (rus).
8. Odessky P.D., Kulik D.V. *Steels with high resistance to extreme impacts*. Moscow, Intermet Engineering Publ., 2008; 239. (rus).
9. Shi Y., Wang J., Zhou X., Xue X., Li Y. Post-fire mechanical properties of Q960 cold-formed thick-walled ultra-high-strength steel. *Fire Technology*. 2024; 60:1917-1953. DOI: 10.1007/s10694-024-01555-3
10. Su A., Wang Ya., Wang Yu., Rasmussen K.J.R., Gardner L. Behaviour and design of S960 ultra-high strength steel non-sleender welded I-section beam-columns. *Engineering Structures*. 2024; 304:117602. DOI: 10.1016/j.engstruct.2024.117602
11. Komissarov A.A., Tikhonov S.M., Ten D.V., Matrosov M.Yu., Glukhov P.A. Comparative fire resistance of modern construction steels. *Steel in Translation*. 2021; 51(11):827-833. DOI: 10.3103/S0967091221110073
12. Lennon T., Mur D.B., Vang Yu.K., Beyli K.G. *Guide for designers to EN 1991-1-2, 1992-1-2, 1993-1-2 and 1994-1-2 : handbook for the design of fire protection of steel, steel-reinforced concrete and concrete structures of buildings and structures in accordance with Eurocodes*. Moscow, MGSU, 2013; 195. (rus).
13. Botyan C.C., Zhamoydik C.M., Olesiyuk H.M. Analysis of evaluation methods of fire resistance of steel building structures, taking into account the effect of heat transfer with adjacent structures. *Journal of Civil Protection*. 2023; 7(2):131-143. DOI: 10.33408/2519-237X.2023.7-2.131 (rus).
14. Yakovlev A.I. *Calculation of fire resistance of building structures*. Moscow, Stroyizdat Publ., 1988; 143. (rus).
15. Komissarov A.A., Tikhonov S.M., Ten D.V., Matrosov M.Yu., Shulga E.V. Fire resistance factors of low-alloyed construction longs. *Steel in Translation*. 2022; 52(7):701-706. DOI: 10.3103/S0967091222070099
16. Komissarov A.A., Tikhonov S.M., Ten D.V., Mazova E.P., Matrosov M.Yu., Glukhov P.A. et al. Analysis of the use of fire-resistant rolled steel S390P for the manufacture of building steel structures. *Steel*. 2022; 12:54-58. (rus).
17. Wang W.Y., Zhang L., He P. A numerical investigation on restrained high strength Q460 steel beams including creep effect. *International Journal of Steel Structures*. 2018; 18(1):1497-1507. DOI: 10.1007/s13296-018-0047-9
18. Dwaikat M.M.S., Kodur V.R. A performance based methodology for fire design of restrained steel beams. *Journal of Constructional Steel Research*. 2011; 67(3):510-524. DOI: 10.1016/j.jcsr.2010.09.004
19. Łukomski M., Turkowski P., Roszkowski P., Bartłomiej P. Fire resistance of unprotected steel beams — comparison between fire tests and calculation models. *Procedia Engineering*. 2017; 172:665-672. DOI: 10.1016/j.proeng.2017.02.078
20. Ghafouri M., Afkhami S., Pokka A.-P., Javaheri V., Togiani A., Larkiola J. et al. Effect of temperature on the plastic flow and strain hardening of direct-quenched ultra-high strength steel S960MC. *Thin-Walled Structures*. 2024; 194:111319. DOI: 10.1016/j.tws.2023.111319

Поступила 11.03.2024, после доработки 01.04.2024;

принята к публикации 16.04.2024

Received March 11, 2024; Received in revised form April 1, 2024;

Accepted April 16, 2024

Информация об авторах

ГОЛОВАНОВ Владимир Ильич, 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; SPIN-код: 8291-1408; ORCID: 0000-0001-6043-0537; e-mail: pavelgol1@yandex.ru

ПЕХОТИКОВ Андрей Владимирович, канд. техн. наук, 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; SPIN-код: 1940-5356, ORCID: 0000-0003-2396-3136; e-mail: pekhotikov.a@mail.ru

ПРИСТУПЮК Дмитрий Николаевич, канд. техн. наук, начальник кафедры пожарной безопасности в строительстве, Академия Государственной противопожарной службы Министерства Российской Федерации по делам гражданской обороны, чрезвычайным ситуациям и ликвидации последствий стихийных бедствий, Россия, 129366, г. Москва, ул. Бориса Галушкина, 4; SPIN-код: 3470-3813, ORCID: 0000-0002-3297-5860; e-mail: zis.pbs@yandex.ru

КРЮЧКОВ Геннадий Игоревич, старший инженер-программист Учебно-научного комплекса пожарной безопасности объектов защиты, Академия Государственной противопожарной службы Министерства Российской Федерации по делам гражданской обороны, чрезвычайным ситуациям и ликвидации последствий стихийных бедствий, Россия, 129366, г. Москва, ул. Бориса Галушкина, 4; SPIN-код: 3492-6471; ResearcherID: ACV-2350-2022; ORCID: 0000-0002-6906-1624; e-mail: dmuxa@bk.ru

Вклад авторов:

Голованов В.И. — научное руководство; обоснование концепции исследования; утверждение окончательного варианта статьи.

Пехотиков А.В. — планирование исследований; анализ и обобщение данных литературы; доработка текста; итоговые выводы.

Приступюк Д.Н. — анализ и систематизация экспериментальных данных; развитие методологии; доработка текста.

Крючков Г.И. — проведение исследования; проведение статистического анализа; подготовка и редактирование текста.

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Information about the authors

Vladimir I. GOLOVANOV, 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; SPIN-code: 8291-1408; ORCID: 0000-0001-6043-0537; e-mail: pavelgol1@yandex.ru

Andrey V. PEKHOTIKOV, Cand. Sci. (Eng.), 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; SPIN-code: 1940-5356, ORCID: 0000-0003-2396-3136; e-mail: pekhotikov.a@mail.ru

Dmitriy N. PRISTUPYUK, Cand. Sci. (Eng.), Head of the Fire Safety in Construction 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; SPIN-code: 3470-3813, ORCID: 0000-0002-3297-5860; e-mail: zis.pbs@yandex.ru

Gennadiy I. KRYUCHKOV, Senior Software Engineer of Educational and Scientific Complex of Fire Safety Protection Facilities, the State Fire Academy of the Ministry of Russian Federation for Civil Defense, Emergencies and Elimination on Consequences of Natural Disasters, Borisa Galushkina St., 4, Moscow, 129366, Russian Federation; SPIN-code: 3492-6471; ResearcherID: ACV-2350-2022; ORCID: 0000-0002-6906-1624; e-mail: dmuxa@bk.ru

Contribution of the authors:

Golovanov V.I. — scientific guidance; justification of the research concept; approval of the final version of the article.

Pekhotikov A.V. — research planning; analysis and generalization of literature data; finalization of the text; final conclusions.

Pristupyuk D.N. — analysis and systematization of experimental data; development of methodology; finalization of the text.

Kryuchkov G.I. — conducting the study; statistical analysis; text preparation and editing.

The authors declare no conflict of interest.

ПОЖАРОВЗРЫВБЕЗОПАСНОСТЬ/FIRE AND EXPLOSION SAFETY. 2024. Т. 33. № 3. С. 57–66
POZHAROVZRYVOBEZOPASNOST/FIRE AND EXPLOSION SAFETY. 2024; 33(3):57-66

НАУЧНАЯ СТАТЬЯ/RESEARCH PAPER

УДК 614.84:624.014

<https://doi.org/10.22227/0869-7493.2024.33.03.57-66>

Аппроксимационная формула для расчета огнестойкости незащищенных стальных конструкций

Юрий Константинович Маликов, Александр Анатольевич Титаев ✉, Вячеслав Олегович Серебренников

Уральский федеральный университет имени первого Президента России Б.Н. Ельцина, Екатеринбург, Россия

АННОТАЦИЯ

Введение. При проектировании зданий требуется оценить фактические пределы огнестойкости незащищенных стальных конструкций. Удобным инструментом для получения такой оценки являются номограммы. Практическая необходимость интеграции «ручной» технологии и современных средств автоматизации проектирования делает актуальной задачу «оцифровки» номограмм путем создания вычислительных моделей данных.

Цели и задачи. Целью работы было получение достаточно простой формулы для расчета предела огнестойкости незащищенных стальных конструкций. Были решены следующие задачи: сопоставление литературных данных по пределам огнестойкости с результатами расчетов по нормативному документу по пожарной безопасности ВНПБ 73–18; расчет четырехзначной таблицы пределов огнестойкости для последующей аппроксимации функциональной зависимости.

Методы. Таблица значений огнестойкости вычислена с четырьмя верными знаками с помощью многошагового метода Адамса переменного порядка. Формула для расчета предела огнестойкости незащищенных стальных конструкций получена методом последовательной аппроксимации табличных данных сначала по одной переменной (приведенная толщина), а затем по другой (критическая температура).

Результаты и обсуждение. Расчет по методике ВНПБ 73–18 дает пределы огнестойкости, близкие к реперным значениям, которые были опубликованы А.И. Яковлевым в 1985 г. Принятые в методике ВНПБ 73–18 значения конвективного и радиационного коэффициентов теплоотдачи соответствуют испытаниям на огнестойкость согласно ГОСТ 30247.0–94 (ИСО 834–75).

Выводы. Получена аппроксимационная формула, вычисления по которой дают те же самые пределы огнестойкости, что и расчеты по методике ВНПБ 73–18. Относительная погрешность аппроксимации не превышает 0,5 % в диапазоне изменения параметров: критическая температура — от 500 до 700 °С; приведенная толщина — от 3 до 12 мм.

Ключевые слова: металлические конструкции; пределы огнестойкости; математическое моделирование; эмпирические зависимости; номограмма

Благодарности. Авторы выражают признательность А.Ю. Маликову за помощь в обзоре эволюции граничных условий для теплотехнических расчетов.

Для цитирования: Маликов Ю.К., Титаев А.А., Серебренников В.О. Аппроксимационная формула для расчета огнестойкости незащищенных стальных конструкций // Пожаровзрывобезопасность/Fire and Explosion Safety. 2024. Т. 33. № 3. С. 57–66. DOI: 10.22227/0869-7493.2024.33.03.57-66.

✉ Титаев Александр Анатольевич, e-mail: a.a.titaev@urfu.ru

Approximation formula for calculating fire resistance of unprotected steel structures

Yuri K. Malikov, Aleksandr A. Titaev ✉, Vyacheslav O. Serebrennikov

Ural Federal University named after the First President of Russia B.N. Yeltsin, Ekaterinburg, Russian Federation

ABSTRACT

Introduction. When designing buildings it is necessary to estimate the actual fire resistance limits of unprotected steel structures. Nomograms are a convenient tool for obtaining such an assessment. Practical necessity of integration of “manual” technology and modern means of design automation makes the task of “digitization” of nomograms by creating computational data models urgent.

Goals and objectives. The purpose of the work was to obtain a rather simple formula for calculating the fire resistance limits of unprotected steel structures. The following tasks were solved: comparison of the literature data on fire resistance limits with the results of calculations according to the normative document on fire safety “VNPB 73–18”; calculation of a four-digit table of fire resistance limits for the subsequent approximation of functional dependence.

Research methods. The table of fire resistance values is calculated with four correct digits using the Adams multistep method of variable order. The formula for calculation of fire resistance limit of unprotected steel structures was obtained by successive approximation of tabular data first by one variable (thickness, i.e. reciprocal of the section factor) and then by another (critical temperature).

Results and discussion. Calculation according to the methodology VNPB 73–18 gives the fire resistance limits close to the reference values, which were published by A.I. Yakovlev in 1985. The values of convective and radiation heat transfer coefficients adopted in the VNPB 73–18 method correspond to the fire resistance tests according to GOST 30247.0–94 (ISO 834–75).

Conclusions. An approximation formula was obtained, the calculations according to which give the same fire resistance limits as the calculations according to the VNPB 73–18 method. Relative error of approximation does not exceed 0.5 % in the range of parameters change: critical temperature — from 500 to 700 °C; thickness — from 3 to 12 mm.

Keywords: metal structures; fire resistance limits; mathematical modelling; empirical relations; nomogram

Acknowledgments. The authors express their gratitude to A.Yu. Malikov for help in reviewing the evolution of boundary conditions for thermal engineering calculations.

For citation: Malikov Yu.K., Titaev A.A., Serebrennikov V.O. Approximation formula for calculating fire resistance of unprotected steel structures *Pozharovzryvbezopasnost/Fire and Explosion Safety*. 2024; 33(3):57-66. DOI: 10.22227/0869-7493.2024.33.03.57-66 (rus).

✉ Aleksandr Anatolyevich Titaev, e-mail: a.a.titaev@urfu.ru

Введение

Определение пределов огнестойкости стальных конструкций основывается на результатах огневых испытаний по ГОСТ 30247.0–94¹. В качестве альтернативы в стандарте СТО АРСС 11251254.001-018–03² описан метод расчета, дающий огнестойкость, эквивалентную той, которая была бы достигнута при стандартных огневых испытаниях [1, 2]. Стандарт согласован и зарегистрирован в качестве нормативного документа по пожарной безопасности с присвоением шифра «ВНПБ 73–18» (письмо МЧС РФ от 31.08.2018 № 19-2-4–1672).

Пределы огнестойкости незащищенных стальных конструкций в обязательном порядке определяются при проектировании огнезащиты (ГОСТ Р 59637–2021, приложение А)³. Кроме этого, этот параметр часто используется для подтверждения адекватности результатов теплотехнических расчетов [3–6]. Небольшая таблица реперных значений огнестойкости (далее — таблица РЗО) была опубликована профессором А.И. Яковлевым⁴. Здесь приведено всего лишь 6 значений огнестойкости для одной критической температуры 500 °C, тогда как обычно этот

параметр лежит в диапазоне от 500 до 700 °C. Кроме того, значения огнестойкости в этой таблице указаны с двумя верными знаками, что приводит к ошибкам округления до ± 4 %.

Конечно, относительная погрешность пределов огнестойкости ± 4 % соответствует общей неопределенности огневых испытаний. Результаты измерения пределов огнестойкости по ГОСТ¹ считаются приемлемыми, если максимальное и минимальное значения для двух испытанных образцов отличаются не более чем на 20 % (от большего значения). Эта неопределенность отражается в протоколе огневых испытаний, где результат округляется до чисел из следующего ряда: 15, 30, 45, 60, 90, 120, 150, 180, 240, 360.

Однако погрешность ± 4 % кажется чрезмерно большой, когда реперные значения огнестойкости используются для тестирования вычислительного кода. Положение об аттестации программных средств требует строгого соответствия между получаемыми результатами и установленными расчетными методиками⁵.

В качестве примера приведем табл. 2.3 из монографии [7]. В этой таблице приводится протокол расчета прогрева незащищенной стальной конструкции согласно правилам проектирования⁶. Полученный результат отличается от правильного всего лишь на 2 %, но это различие свидетельствует об ошибке

¹ ГОСТ 30247.0–94. Конструкции строительные. Методы испытаний на огнестойкость. Общие требования (ИСО 834–75).

² СТО АРСС 11251254.001-018–03 (ВНПБ 73–18). Проектирование огнезащиты несущих стальных конструкций с применением различных типов облицовок.

³ ГОСТ Р 59637–2021. Национальный стандарт Российской Федерации. Средства противопожарной защиты зданий и сооружений. Средства огнезащиты. Методы контроля качества огнезащитных работ при монтаже (нанесении), техническом обслуживании и ремонте (утв. и введен в действие Приказом Росстандарта от 24.08.2021 № 790-ст).

⁴ Пособие по определению пределов огнестойкости конструкций, пределов распространения огня по конструкциям и групп возгораемости материалов (к СНиП 11-2–80). Табл. 11. М. : СТРОЙИЗДАТ, 1985.

⁵ Приказ Госатомнадзора РФ от 28.12.2000 № 122 (ред. от 13.12.2001. п. 19). Об утверждении и введении в действие Требований к составу и содержанию отчета о верификации и обосновании программных средств, применяемых для обоснования безопасности объектов использования атомной энергии, и изменения № 1 в Положение об аттестации программных средств, используемых при обосновании или обеспечении безопасности ядерно и/или радиационно опасных объектов и производств.

⁶ EN 1993-1-2. Eurocode 3: Design of steel structures — Part 1-2: General rules — Structural fire design. 1995.

в VBA-коде, который использовался для заполнения табл. 2.3.

В настоящей работе методика ВНПБ 73–18² использовалась для актуализации составленной А.И. Яковлевым таблицы РЗО незащищенных стальных конструкций с указанием 4 значащих цифр и добавлением данных для критических температур 600 и 700 °С. Эти данные сопоставлены с расчетами по европейским стандартам. Для целей проектирования огнезащиты и тестирования разнообразных программных средств предложена эмпирическая формула, погрешность которой не превышает 0,5 % в диапазоне параметров: критическая температура — от 500 до 700 °С; приведенная толщина — от 3 до 12 мм.

Расчет огнестойкости по методике ВНПБ 73–18²

Тепловое воздействие пожара задается результирующим тепловым потоком, который подводится к поверхности конструкции за счет излучения и конвекции:

$$q_M = q_c + q_r; \quad (1)$$

$$q_c = \alpha \cdot (T_F - T_M); \quad (2)$$

$$q_r = \varepsilon \cdot \sigma \cdot (T_F^4 - T_M^4); \quad (3)$$

$$T_F = t_F + T_T, \quad T_M = t_M + T_T; \quad (4)$$

$$t_F = 20 + 345 \cdot \lg\left(\frac{2}{15} \cdot \tau + 1\right), \quad (5)$$

где q — плотность теплового потока, Вт/м²;

t и T — температура, °С и К соответственно;

τ — время от начала пожара, с.

Индексы обозначают: M — металл; c — конвекция; r — излучение; F — пламя.

Остальные обозначения приведены в табл. 1.

Результатом теплового воздействия пожара является нагрев стальной конструкции. При известных допущениях [9] этот процесс описывается обыкновенным дифференциальным уравнением первого порядка:

$$\frac{\partial t_M}{\partial \tau} = \frac{q_M}{\rho_M C_M S_M}, \quad (6)$$

где S_M — приведенная толщина стальной конструкции, м;

C_M — удельная теплоемкость металла, которая в методике ВНПБ 73–18² определяется как линейная функция температуры:

$$C_M = 310 + 0,48 T_M. \quad (7)$$

Таблица 1. Принятые в методике ВНПБ 73–18² значения параметров теплового воздействия стандартного пожара
Table 1. Values of thermal impact parameters of a standard fire, adopted in the VNPB 73–18² method

Номер по порядку Number in order	Наименование параметра Parameter name	Обозначение Symbol	Размерность Dimension	Значение Value
1	Коэффициент теплоотдачи конвекцией Convection heat transfer coefficient	α	Вт/(м ² ·К) W/(m ² ·K)	29
2	Приведенная степень черноты Apparent emissivity	ε	—	0,5629
3	Постоянная Стефана — Больцмана* Stefan-Boltzmann constant*	σ	Вт/(м ² ·К ⁴) W/(m ² ·K ⁴)	$5,77 \cdot 10^{-8}$
4	Тройная точка воды Triple point of water	T_τ	К	273
5	Плотность стали* Steel density*	ρ_M	кг/м ³ kg/m ³	7800

* Нестандартное значение этих констант общепринято в Российской пожарно-технической литературе [4, 8–10].

* Non-standard values of these constants are generally accepted in Russian fire-technical literature [4, 8–10].

Предел огнестойкости конструкции с приведенной толщиной S определяется как время $R(S, \theta)$ необходимое для прогрева конструкции до критической температуры θ .

Уравнение (6) интегрировалось с помощью программы ODE113 из библиотеки MATLAB. Программа реализует многошаговый метод Адамса переменного порядка и обеспечивает решение задачи с контролируемой точностью: абсолютная погрешность не более 0,01 °С. Полученные значения пределов огнестойкости тестировались путем повторного интегрирования уравнения (6) с применением явной разностной схемы с постоянным шагом по времени, приблизительно равным 0,04 с.

Сопоставление с другими моделями

Приведенная степень черноты ε в уравнении (3) является ключевым параметром модели теплового воз-

действия пожара. В методике ВНПБ 73–18² для определения ε используется рекомендованная А.И. Яковлевым [9] формула:

$$\varepsilon = 1 / (1 / 0,85 + 1 / \varepsilon_m - 1), \quad (8)$$

где 0,85 — степень черноты излучающей поверхности;

ε_m — степень черноты обогреваемой поверхности.

Эта формула известна как приближение диатермической среды. Продукты сгорания топлива в рабочем пространстве испытательной печи считаются прозрачными для излучения [10]. В качестве нагревателя рассматривается футеровка печи. Конечно, такое допущение не соответствует общепринятым моделям радиационного теплообмена в пламенных печах [11, 12].

«В связи с отсутствием экспериментальных данных» в работе А.И. Яковлева [9] не указано адаптированное к результатам огневых испытаний значение ε_m . В работах [4, 8, 13] использовали $\varepsilon_m = 0,74$, что существенно отличается от нормируемого методикой ВНПБ 73–18² и рекомендуемого в [2] значения $\varepsilon_m = 0,625$. Возникает вопрос: какому значению ε_m отвечают приведенные в Таблице РЗО расчетные данные А.И. Яковлева?

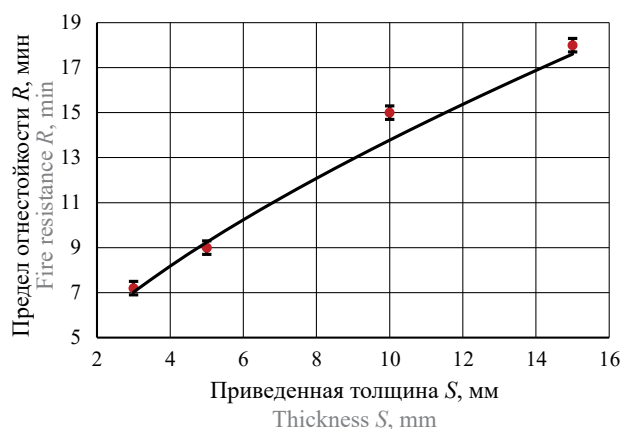
Сплошная линия на рисунке отражает результаты расчета по методике ВНПБ 73–18². Данные А.И. Яковлева показаны на рисунке точками с планками ошибок, которые соответствуют $\pm 0,3$ мин или 1/2 единицы последнего десятичного знака, указанного в Таблице РЗО. Видно, что методика ВНПБ 73–18² идентична той, которую использовал А.И. Яковлев в своих работах. Выпадающее значение $R = 15$ мин при $S = 10$ мм является опечаткой: вместо неверного $R = 0,25$ ч следует читать $R = 0,23$ ч.

В работе [2] расчеты по методике ВНПБ 73–18² сопоставлены с номограммами прогрева незащищенных стальных пластин, которые были получены в результате обработки опытных данных. Рассчитанная огнестойкость отклоняется от сглаженных опытных данных не более чем на 6,6 %.

Таблица 2. Расчетная огнестойкость незащищенных стальных конструкций (в минутах) по различным моделям: А — ВНПБ 73–18²; В — ENV 1993-1-2:1995⁶

Table 2. Calculated fire resistance of unprotected steel structures (in minutes) according to different models: А — VNPB 73–18²; В — ENV 1993-1-2:1995⁶

Критическая температура, °C Critical temperature, °C	Модель Model	Приведенная толщина, мм Thickness, mm					
		3	5	10	15	20	30
500	A	7,028	9,240	13,78	17,60	21,03	27,16
	B	7,470	9,871	14,79	18,94	22,65	29,31
600	A	9,511	12,05	17,42	21,99	26,09	33,44
	B	10,09	12,88	18,75	23,73	28,21	36,23
700	A	14,11	16,51	22,40	27,65	32,43	41,03
	B	14,99	17,84	24,51	30,37	35,69	45,26



Огнестойкость незащищенных стальных конструкций при критической температуре 500 °C

Fire resistance of unprotected steel structures at critical temperature 500 °C

В сентябре 1995 г. был опубликован проект стандарта⁶, в котором приведена модель прогрева незащищенных стальных конструкций под воздействием стандартного пожара (п. 4.2.5.1). Эта модель так же, как и методика ВНПБ 73–18², обобщала результаты огневых испытаний по ИСО 834–75¹. В ней использовалось то же самое значение $\varepsilon_m = 0,625$, а приведенная степень черноты определялась как:

$$\varepsilon = \varepsilon_f \varepsilon_m, \quad (9)$$

где ε_f — излучательная способность пламени.

В стандарте⁶ принималось $\varepsilon_f = 0,8$, $\varepsilon_m = 0,625$, так что $\varepsilon = 0,5$. Такое низкое значение приведенной степени черноты является единственным отличием модели ENV 1993-1-26 от современной модели прогрева незащищенных стальных конструкций под воздействием стандартного пожара (см. EN 1993-1-26 и EN 1991-1-2⁷). Расчет по стандарту ENV 1993-1-2:1995⁶ давал огнестойкость на 6...10 % выше, чем расчет по методике ВНПБ 73–18² (табл. 2).

⁷ EN 1991-1-2 (2002) (English): Eurocode 1: Actions on structures — Part 1-2: General actions — Actions on structures exposed to fire.

Удовлетворительное совпадение расчетных данных из различных источников подтверждает обоснованность принятого в методике ВНПБ 73–18² значения приведенной степени черноты обогреваемой поверхности $\varepsilon_m = 0,625$. Конечно, такое значение степени черноты стальной поверхности характерно для конкретных условий проведения огневых испытаний по стандарту ИСО 834–75¹. Другим условиям огневого воздействия могут соответствовать другие значения ε_m . Например, в расчетно-экспериментальных исследованиях нагрева металла в пламенных печах [12] чаще всего используется значение $\varepsilon_m = 0,8$.

Эволюция моделей теплового воздействия пожара

В формуле (9) в качестве греющей среды рассматривается пламя, которое излучает, поглощает, но не рассеивает тепловое излучение. В европейской пожарно-технической литературе 70-х годов прошлого века упоминается, что наблюдаемое при натурных испытаниях значение излучательной способности пламени лежит в пределах $\varepsilon_f = 0,6 \dots 0,9$. В стандарте ENV 1993-1-2:1995⁶ принято среднее значение $\varepsilon_f = 0,8$, а в методике ВНПБ 73–18² $\varepsilon_f = 0,85$. Это означает, что измеряемая пирометром полного излучения яркостная температура рабочего пространства испытательной печи должна быть приблизительно на 5 % ниже температуры стандартного пожара (5). Для поддержания такого температурного режима испытательной печи ГОСТ 30247.0–94¹ предусматривает управление печью по показаниям термопары с открытым спаем. На практике оказалось, что показания термопары с открытым спаем зависят от конструкции печи. По этой причине трудно ожидать одинаковых результатов огневых испытаний, выполненных в различных центрах. «Расхождения результатов на совершенно идентичных образцах могут достигать 30 %» [14].

В августе 1999 г. был опубликован международный стандарт ИСО 834-1–1999⁸.

Изменения в стандарте ISO 834¹ и европейском стандарте EN 1363⁶ были направлены в первую очередь на улучшение воспроизводимости испытаний. Эта цель была достигнута: тепловое воздействие на образец в различных испытательных печах «... теперь более или менее не зависит от топлива и конструкции печи» [15]. Для гармонизации испытаний на огнестойкость использовались два основных инструмента: футеровка печей материалами с низкой

теплопроводностью [16] и контроль температуры с помощью пластинчатых термометров [17, 18].

Регулирование температуры испытательной печи с помощью пластинчатых термометров означает, что яркостная температура пламени в рабочем пространстве испытательной печи будет близка к стандартному значению (5), а излучательная способность пламени в формуле (9) будет близка к единице [19]. Таким образом, побочным, но ожидаемым [15] эффектом гармонизации стало повышение термической жесткости огневых испытаний.

В опубликованном в апреле 2005 г. стандарте⁹ модель теплового воздействия стандартного пожара на незащищенные стальные конструкции приведена в соответствие с американским стандартом¹⁰: $\varepsilon_f = 1,0$; $\varepsilon_m = 0,7$, так что $\varepsilon = 0,7$. Новый норматив ε_m (0,7 вместо 0,625) был получен методом обратного пересчета (by retroactive accounting) результатов огневых испытаний по EN 1363-1:2012¹¹. Таким образом, ε_m является не физической величиной, а безопасным значением подгоночного параметра в модели теплового воздействия пожара.

Точно так же, на результатах огневых испытаний¹² основана принятая в новом европейском стандарте EN 1363–1:2020¹³ ступенчатая температурная зависимость ε_m для горячеоцинкованных стальных элементов: $\varepsilon_m = 0,35$ при $t \leq 500$ °C; $\varepsilon_m = 0,7$ при $t > 500$ °C.

Стандартный метод определения оптических характеристик различных материалов основан на измерении яркостной температуры с помощью пирометра. Такой метод использован в работе [20] для измерения нормально-полусферической излучательной способности (степени черноты) горячеоцинкованного стального листа. При первом нагреве на воздухе до 500 °C степень черноты цинкового покрытия изменяется в пределах 0,1...0,2, что в два раза ниже безопасного норматива $\varepsilon_m = 0,35$.

Более низкий коэффициент излучения для температур до 500 °C позволяет расчетным путем обосновать противопожарную защиту R30 без дополнительных мер в случае толстых профилей и составных конструкций. Примером может служить монолитная бетонная плита по несъемной опалубке из оцинкованного профилированного листа.

⁹ EN 1993-1-2:2005. Eurocode 3: Design of steel structures — Part 1-2: General rules — Structural fire design.

¹⁰ ANSI/AISC 360-10. An American National Standard “Specification for Structural Steel Buildings”. June 22, 2010. (п. 4.2.2).

¹¹ EN 1363-1:2012. Fire resistance tests — Part 1: General Requirements.

¹² Gaigl C., Mensinger M. Hot dip galvanized steel constructions under fire exposure. IFireSS 2017 2nd International Fire Safety Symposium Naples, Italy, June 7–9, 2017. URL: <http://www.researchgate.net/publication/322144363> (accessed: February 2, 2024).

¹³ EN 1363-1:2020. Fire resistance tests — Part 1: General requirements.

⁸ ISO 834-1:1999. Fire-resistance tests — Elements of building construction.

Эмпирические формулы

Оцифровка номограмм прогрева незащищенных стальных конструкций (ВНПБ 73–18, прил. А)² облегчает автоматизацию расчетов при проектировании огнезащиты. Если исходить из типичной точности номограмм, то их аппроксимация эмпирическими формулами с относительной погрешностью $\pm 3\%$ может считаться допустимой.

Требования к точности аппроксимации пределов огнестойкости возрастают, когда эмпирические формулы используются для тестирования программных комплексов.

Определенная уверенность в том, что полученный результат совпадает с ожидаемым, появляется при совпадении двух значащих цифр, что соответствует относительной погрешности аппроксимации не более $\pm 0,5\%$. Этому условию отвечают нижеприведенные аналитические выражения для расчета пределов огнестойкости незащищенных стальных конструкций:

$$R(S, \theta) = A(\theta) \left[1 + B(\theta) \ln \left(1 + \frac{S-3}{E(\theta)} \right) \right] \pm 0,5\%, \text{ с,} \quad (10)$$

$$3 \leq S \leq 12 \text{ мм}, \quad 500 \leq \theta \leq 700^\circ\text{C}.$$

Обозначим:

$$X = \frac{\theta}{100} - 5,199; \quad Y = \frac{\theta}{100} - 6,780; \quad Z = \frac{\theta}{100} - 6,834.$$

Тогда:

$$A = 446,1 + X(128,54 + X(28,7 + 7,15 X^2)); \quad (11)$$

$$B = 2,283 + 11,81(0,9927 Y + \sqrt{Y^2 + 0,0467}); \quad (12)$$

$$E = 13,75 + 186,2(1,0028 Z + \sqrt{Z^2 + 0,0543}). \quad (13)$$

Остановимся кратко на методе, с помощью которого была получена формула (10). В последнее время для численного моделирования и оценки воздействия пожара на стальные конструкции стал использоваться аппарат искусственных нейронных сетей [21, 22]. В работах [23, 24] делается попытка определения прочностных свойств стали при воздействии пожара с помощью аппроксимационных полиномиальных моделей. Авторы работы [25] определяют воздействие пожара на стальные конструкции методом Монте-Карло. Нейросетевой подход для расчета предела огнестойкости стальных колонн, наполненных бетоном, сделан в работе [26]. Огнестойкость листовых перегородок из металла с помощью выбора разных функций активации в нейросети исследована авторами [27]. Некоторые аспекты аппроксимации

и интерполяции функций искусственными нейронными сетями рассмотрены в работах [28, 29].

Эти работы показывают огромный потенциал применения нейронных сетей для изучения функциональных зависимостей и создания математических моделей. По существу, единственным недостатком нейросетевой модели является то, что она остается «черным ящиком».

Авторы использовали технологию машинного обучения для распознавания элементарных функций и автоматизированного выбора наиболее подходящей трехпараметрической аппроксиманты (эмпирической зависимости, тенденции, тренда). Подбор оптимальных параметров аппроксиманты выполняется с помощью стандартных программ. Хотя такой подход не является универсальным, он во многих случаях позволяет получить наглядную и удобную для практического использования математическую модель. В частности, формула (10) может быть преобразована к виду:

$$S = 3 + E \left[\exp \left(\frac{R - A}{AB} \right) - 1 \right]. \quad (14)$$

Такая форма записи позволяет определить необходимую приведенную толщину стальной конструкции в зависимости от заданных значений предела огнестойкости и критической температуры.

Практическое применение

Пример 1. Найти минимальную приведенную толщину, при которой предел огнестойкости незащищенной стальной конструкции будет не ниже R15. Предельное значение критической температуры для малонагруженной конструкции составляет 700°C . Расчет по формуле (14) дает $S = 3,74$ мм.

Подробности расчета. Предел огнестойкости $R = 15 \times 60 = 900$ с; критическая температура $\theta = 700^\circ\text{C}$, $X = 1,80$, $Y = 0,22$, $Z = 0,17$, $A = 845,92$, $B = 8,50$, $E = 98,02$.

Пример 2. В работе [4] с помощью программного комплекса ANSYS mechanical моделировался прогрев незащищенной профильной трубы $160 \times 160 \times 5$ под воздействием стандартного пожара. Для критической температуры $\theta = 650^\circ\text{C}$ получен предел огнестойкости $R = 12,7$ мин. Расчет по формуле (10) дает $R = 13,78 \pm 0,07$ мин.

Такое расхождение расчетных данных объясняется тем, что принятое в работе [4] значение степени черноты обогреваемой поверхности $\varepsilon_m = 0,74$ не соответствует нормируемому в методике ВНПБ 73–18² значению $\varepsilon_m = 0,625$.

Подробности расчета. Профильная труба $160 \times 160 \times 5$: площадь сечения 3035,5 кв. мм; обогреваемый периметр 622,83 мм; приведенная толщина

$S = 4,874$ мм. Критическая температура $\theta = 650$ °С, $X = 1,30$, $Y = -0,28$, $Z = -0,33$, $A = 682,39$, $B = 3,18$, $E = 27,22$.

Пример 3. В работе [3] «проведены исследования по вопросам моделирования пожарной нагрузки в программном комплексе ANSYS» и получены следующие результаты: при трехстороннем обогреве стальной балки 25Б1 в режиме стандартного пожара через 7,5 мин достигнута температура 550 °С. Расчет по формуле (10) для критической температуры $\theta = 550$ °С и приведенной толщины 3,903 мм дает $R = 9,723 \pm 0,05$ мин. Расхождение с данными [3] составляет $100(9,23 - 7,5)/9,23 = 19$ %. Причиной столь существенных отличий могут быть ошибки, допущенные при формировании математической модели в многофункциональном комплексе ANSYS.

Подробности расчета. Балка 25Б1: площадь сечения 3268 мм²; обогреваемый периметр 837,4 мм; приведенная толщина $S = 3,903$ мм. Критическая температура $\theta = 550$ °С, $X = 0,30$, $Y = -1,28$, $Z = -1,33$, $A = 487,45$, $B = 2,61$, $E = 16,82$.

Результаты исследования и их обсуждение

В течение длительного времени в России отсутствуют общие правила проектирования стальных конструкций на случай пожара. Для расчета огнестойкости незащищенных стальных конструкций МЧС РФ рекомендовало¹⁴ использовать «апробированные методики», которые можно найти в обширной пожарно-технической литературе.

На практике оказалось, что между этими методиками имеется одно, но существенное отличие. В некоторых из них степень черноты обогреваемой поверхности стальной конструкции принимается равной $\epsilon_m = 0,625$, а в других методиках — $\epsilon_m = 0,74$. Поскольку это расхождение ничем не мотивировано, то, следуя рекомендациям МЧС РФ¹³, проектировщик оказывается на распутье.

В работе сделана попытка устранить сложившуюся неопределенность в российских методи-

ках расчета огнестойкости путем исторического анализа европейских норм. Показана связь между граничными условиями для теплотехнического расчета и общими принципами определения огнестойкости стальных элементов каркаса. Принятое в нормативном документе по пожарной безопасности ВНПБ 73–18² значение $\epsilon_m = 0,625$ соответствует испытаниям на огнестойкость согласно¹. Однако испытания согласно⁸ дают другое значение ϵ_m .

В статье показано, что расчет по методике ВНПБ 73–18² дает пределы огнестойкости, близкие к реперным значениям, которые были опубликованы А.И. Яковлевым⁴.

На основании методики ВНПБ 73–18² составлена четырехзначная таблица пределов огнестойкости стальных конструкций. Табличные значения огнестойкости аппроксимированы с помощью формулы, состоящей из элементарных функций и зависящей от двух параметров: приведенной толщины конструкции и критической температуры.

Выводы

1. Граничные условия для теплотехнического расчета зависят от национального стандарта на испытания на огнестойкость и по этой причине должны определяться в строительных нормах и правилах.

2. Составленная А.И. Яковлевым таблица реперных значений огнестойкости незащищенных стальных конструкций актуализирована на основе методики ВНПБ 73–18² с расширением на критические температуры 600 и 700 °С.

3. В работе получена аппроксимационная формула, вычисления по которой дают те же самые пределы огнестойкости, что и расчеты по методике ВНПБ 73–18². Относительная погрешность аппроксимации не превышает 0,5 % в диапазоне изменения параметров: критическая температура — от 500 до 700 °С; приведенная толщина — от 3 до 12 мм.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Голованов В.И., Павлов В.В., Пехотиков А.В., Пронин Д.Г. Стандартизация и внедрение расчетных методов в области огнезащиты несущих стальных конструкций // Актуальные проблемы пожарной безопасности : мат. XXXI Междунар. науч.-практ. конф. М. : ВНИИПО, 2019. С. 26–29.
2. Голованов В.И., Крючков Г.И. Оценка огнестойкости стальных конструкций при нормируемых температурных режимах пожара // Пожары и чрезвычайные ситуации: предотвращение, ликвидация. 2021. № 3. С. 52–60. DOI: 10.25257/FE.2021.3.52-60
3. Бардин А.В. Моделирование пожарной нагрузки на конструкции в программном комплексе ANSYS // Строительство уникальных зданий и сооружений. 2016. № 6 (45). С. 55–67.

¹⁴ Письмо МЧС РФ № ИГ–117–1–13–2 от 11.01.2021.

4. Минайлов Д.А. Исследование огнестойкости стальных конструкций покрытия складского здания в условиях различного температурного воздействия // Пожаровзрывобезопасность/Fire and Explosion Safety. 2020. Т. 29. № 3. С. 54–65.
5. Симонова М.А., Романов Н.Н., Пермяков А.А., Федоров А.В., Кораблев В.А., Волков Д.П. Расчет температурных полей несущих металлических конструкций в условиях высокотемпературного воздействия для оценки огнестойкости // Вестник Международной академии холода. 2021. № 2. С. 88–97. DOI: 10.17586/1606-4313-2021-20-2-88-97
6. Шебеко Ю.Н., Зубань А.В., Шебеко А.Ю. Расчет фактического предела огнестойкости незащищенных стальных конструкций при различных температурных режимах пожара // Пожаровзрывобезопасность/Fire and Explosion Safety. 2019. Т. 28. № 6. С. 29–34. DOI: 10.18322/PVB.2019.28.06.29-34
7. Гравит М.В., Дмитриев И.И. Огнестойкость легких стальных тонкостенных конструкций : монография. СПб. : ПОЛИТЕХПРЕСС, 2020. 213 с.
8. Мосалков И.Л., Плюснина Г.Ф., Фролов А.Ю. Огнестойкость строительных конструкций. М. : ЗАО «Спецтехника», 2001. 496 с.
9. Яковлев А.И. Расчет огнестойкости строительных конструкций. М. : Стройиздат, 1988. 143 с.
10. Молчадский И.С. Пожар в помещении. М. : ВНИИПО, 2005. 456 с.
11. Невский А.С. Лучистый теплообмен в печах и топках. М. : Metallurgy, 1971. 440 с.
12. Лисиенко В.Г., Волков В.В., Маликов Ю.К. Улучшение топливоиспользования и управление теплообменом в металлургических печах. М. : Metallurgy, 1988. 231 с.
13. Ройтман В.М. Инженерные решения по оценке огнестойкости проектируемых и реконструируемых зданий. М. : Ассоциация «Пожарная безопасность и наука», 2001. 382 с.
14. Ненахов С.А., Пименова В.П., Пименов А.Л. Проблемы огнезащитной отрасли // Пожаровзрывобезопасность/Fire and Explosion Safety. 2010. Т. 19. № 12. С. 19–26.
15. Wickstrom U. The adiabatic surface temperature and the plate thermometer // Fire Safety Science-Proceedings of the Tenth International Symposium : International Association for Fire Safety Science. 2011. Pp. 1001–1012. DOI: 10.3801/IAFFS.FSS.10-1001
16. Sultan M.A. Fire resistance furnace temperature measurements: plate thermometers vs shielded thermocouples // Fire Technology. 2006. Vol. 42. No. 3. Pp. 253–267. DOI: 10.1007/s10694-006-8431-7
17. Wickstrom U. The plate thermometer — a simple instrument for reaching harmonized fire resistance tests // Fire Technology. 1994. Vol. 30. No. 2. Pp. 195–208. DOI: 10.1007/BF01040002
18. Cooke G.M.E. Can harmonization of fire resistance furnaces be achieved by plate thermometer control? // Fire Safety Science-Proceedings of the Fourth International Symposium : International Association for Fire Safety Science. 1994. Pp. 1195–1207. DOI: 10.3801/IAFSS.FSS.4-1195
19. Wickstrom U. Temperature Calculation in Fire Safety Engineering : Springer International Publishing Switzerland. 2016. 250 p. DOI: 10.1007/978-3-319-30172-3
20. Elich J.J.P., Hamerlinck A.F. Thermal properties of galvanized steel and its importance in enclosure fire scenarios // Fire Safety Journal. 1990. Vol. 16. Pp. 469–482.
21. Lee E.W.M. Application of artificial neural network to fire safety engineering. Handbook on Decision Making. 2010. Vol. 4. Pp. 369–396. DOI: 10.1007/978-3-642-13639-9_15
22. Hanin B. Universal function approximation by deep neural nets with bounded width and ReLU activations // Mathematics. 2019. Vol. 7. Issue 10. Pp. 1–9. DOI: 10.3390/math7100992
23. de Santana Gomes W.J. Structural reliability analysis using adaptive artificial neural networks // ASME. ASME J. Risk Uncertainty Part B. 2019. Vol. 5. Issue. 4. Pp. 1–8. DOI: 10.1115/1.4047636
24. Chaudhary R.K., Van Coile R., Gernay T. Potential of Surrogate modelling for probabilistic fire analysis of structures // Fire Technology. 2021. Vol. 57. No 3. Pp. 3151–3177. DOI: 10.1007/s10694-021-01126-w
25. Alverlandro Silva Ricardo, Wellison Jose de Santana Gomes. Structural reliability methods applied in analysis of steel elements subjected to fire // Journal of Engineering Mechanics. 2021. Vol. 147. Issue 12. Pp. 4021–4029. DOI: 10.1061/(ASCE)EM.1943-7889.0002023
26. Moradi M.J., Kambiz D., Ghazi-nader D., Hajiloo H. The prediction of fire performance of concrete-filled steel tubes (CFST) using artificial neural network // Thin-Walled Structures. 2021. Vol. 161. Issue 12. Pp. 1–17. DOI: 10.1016/j.tws.2021.107499
27. Kesawan S., Rachmadini R., Sabesan S., Janarthanan B. Application of neural networks for light gauge steel fire walls // Engineering Structures. 2023. Vol. 278. Pp. 6–14. DOI: 10.1016/j.engstruct.2022.115445
28. Guliyev N.J., Ismailov V.E. Approximation capability of two hidden layer feedforward neural networks with fixed weights // Neurocomputing. 2018. Vol. 316. Pp. 262–269.

29. Almira J.M., Lopez-de-Teruel P.E., Romero-L'opez D.J., Voigtlaender F. Negative results for approximation using single layer and multilayer feedforward neural networks // *Journal of Mathematical Analysis and Applications*. 2021. Vol. 494. Issue 1. Pp. 1–10. DOI: 10.1016/j.jmaa.2020.124584

REFERENCES

- Golovanov V.I., Pavlov V.V., Pekhotikov A.V., Pronin D.G. Standardization and the introduction of calculation methods for fire protection load-carrying steel structures. *Actual problems of fire safety : XXXty problems of fire safetyods for fir*. Moscow, VNIPO, 2019; 26-29. (rus).
- Golovanov V.I., Kryuchkov G.I. Steel structures fire resistance assessment under standardized fire temperature regimes. *Fires and emergencies: prevention, liquidation*. 2021; 3:52-60. DOI: 10.25257/FE.2021.3.52-60 (rus).
- Bardin A.V. Fire load modeling on the structure in ANSYS. *Construction of Unique Buildings and Structures*. 2016; 6(45):55-67 (rus).
- Minailov D.A. Investigation of fire resistance of steel structures covering a warehouse building under different temperature conditions. *Pozharovzryvobezopasnost/Fire and Explosion Safety*. 2020; 29(3):54-65. (rus).
- Simonova M.A., Romanov N.N., Permyakov A.A., Fedorov A.V., Korablev V.A., Volkov D.P. Method of engineering calculation of the fire resistance limit for load-bearing metal structures. *Journal of International Academy of Refrigeration*. 2021; 2:88-97. DOI: 10.17586/1606-4313-2021-20-2-88-97 (rus).
- Shebeko Yu.N., Zuban A.V., Shebeko A.Yu. An evaluation of an actual fire resistance limit of non-protected steel structures for different temperature regimes of fires. *Pozharovzryvobezopasnost/Fire and Explosion Safety*. 2019; 28(6):29-34. DOI: 10.18322/PVB.2019.28.06.29-34 (rus).
- Gravit M.V., Dmitriev I.I. *Fire resistance of light steel framing*. Saint Petersburg, POLITEKHPRESS, 2020; 213. (rus).
- Mosalkov I.L., Plusnina G.F., Frolov A.Yu. *Fire resistance of building structures*. Moscow, ZAO "Spectekhnika", 2001; 496. (rus).
- Yakovlev A.I. *Calculation of fire resistance of building structures*. Moscow, Stroyizdat Publ., 1988; 144. (rus).
- Molchadskii I.S. *Fire in the indoors*. Moscow, VNIPO, 2005; 456. (rus).
- Nevskii A.S. *Radiant heat transfer in furnaces and firebox*. Moscow, Metallurgiya Publ., 1971:440. (rus).
- Lisienko V.G., Volkov V.V., Malikov Y.K. *Improved fuel efficiency and control of metal heating in reheat furnaces*. Moscow, Metallurgiya Publ., 1988; 231. (rus).
- Roitman V.M. *Engineering solutions for assessing the fire resistance of designed and reconstructed buildings*. Moscow, Association "Fire safety and science", 2001; 382. (rus).
- Nenakhov S.A., Pimenova V.P., Pimenov A.L. Problems of fire protection system. *Pozharovzryvobezopasnost/Fire and Explosion Safety*. 2010; 19(12):19-26. (rus).
- Wickstrom U. The adiabatic surface temperature and the plate thermometer. *Fire Safety Science-Proceedings of the Tenth International Symposium : International Association for Fire Safety Science*. 2011; 1001-1012. DOI: 10.3801/IAFFS.FSS.10-1001
- Sultan M.A. Fire resistance furnace temperature measurements: plate thermometers vs shielded thermocouples. *Fire Technology*. 2006; 42(3):253-267. DOI: 10.1007/s10694-006-8431-7
- Wickstrom U. The plate thermometer — a simple instrument for reaching harmonized fire resistance tests. *Fire Technology*. 1994; 30(2):195-208. DOI: 10.1007/BF01040002
- Cooke G.M. Can harmonization of fire resistance furnaces be achieved by plate thermometer control? *Fire Safety Science-Proceedings of the Fourth International Symposium : International Association for Fire Safety Science*. 1994; 1195-1207. DOI: 10.3801/IAFSS.FSS.4-1195
- Wickstrom U. *Temperature Calculation in Fire Safety Engineering : Springer International Publishing Switzerland*. 2016; 250. DOI: 10.1007/978-3-319-30172-3
- Elich J.J.P., Hamerlinck A.F. Thermal properties of galvanized steel and its importance in enclosure fire scenarios. *Fire Safety Journal*. 1990; 16:469-482.
- Lee E.W.M. Application of artificial neural network to fire safety engineering. *Handbook on Decision Making*. 2010; 4:369-396. DOI: 10.1007/978-3-642-13639-9_15
- Hanin B. Universal function approximation by deep neural nets with bounded width and ReLU activations. *Mathematics*. 2019; 7(10):1-9. DOI: 10.3390/math7100992
- de Santana Gomes W.J. Structural reliability analysis using adaptive artificial neural networks. *ASME. ASME J. Risk Uncertainty Part B*. 2019; 5(4):1-8. DOI: 10.1115/1.4047636
- Chaudhary R.K., Van Coile R., Gernay T. Potential of surrogate modelling for probabilistic fire analysis of structures. *Fire Technology*. 2021; 57(3):3151-3177. DOI: 10.1007/s10694-021-01126-w
- Alverlandro Silva Ricardo, Wellison Jose de Santana Gomes. Structural reliability methods applied in analysis of steel elements subjected to fire. *Journal of Engineering Mechanics*. 2021; 147(12):4021-4029. DOI: 10.1061/(ASCE)EM.1943-7889.0002023

26. Moradi M.J., Kambiz D., Ghazi-nader D., Hajiloo H. The prediction of fire performance of concrete-filled steel tubes (CFST) using artificial neural network. *Thin-Walled Structures*. 2021; 161(2):1-17. DOI: 10.1016/j.tws.2021.107499
27. Kesawan S., Rachmadini R., Sabesan S., Janarthanan B. Application of neural networks for light gauge steel fire walls. *Engineering Structures*. 2023; 278:6-14. DOI: 10.1016/j.engstruct.2022.115445
28. Guliyev N.J., Ismailov V.E. Approximation capability of two hidden layer feedforward neural networks with fixed weights. *Neurocomputing*. 2018; 316:262-269.
29. Almira J.M., Lopez-de-Teruel P.E., Romero-L'opez D.J., Voigtlaender F. Negative results for approximation using single layer and multilayer feedforward neural networks. *Journal of Mathematical Analysis and Applications*. 2021; 494(1):1-10. DOI: 10.1016/j.jmaa.2020.124584

Поступила 07.02.2024, после доработки 29.02.2024;

принята к публикации 11.03.2024

Received February 7, 2024; Received in revised form February 29, 2024;

Accepted March 11, 2024

Информация об авторах

МАЛИКОВ Юрий Константинович, канд. техн. наук, директор научно-исследовательского центра, Уральский федеральный университет им. первого Президента России Б.Н. Ельцина, Россия, 620002, г. Екатеринбург, ул. Мира, 19; РИНЦ ID: 134294; Scopus AuthorID: 6603995452; ORCID: 0009-0009-4334-7526; e-mail: uma66p@mail.ru

ТИТАЕВ Александр Анатольевич, канд. техн. наук, доцент, Уральский федеральный университет им. первого Президента России Б.Н. Ельцина, Россия, 620002, г. Екатеринбург, ул. Мира, 19; РИНЦ ID: 546224; Scopus AuthorID: 26649649000; ORCID: 0000-0002-3778-7033; e-mail: a.a.titaev@urfu.ru

СЕРЕБРЕННИКОВ Вячеслав Олегович, магистрант, Уральский федеральный университет им. первого Президента России Б.Н. Ельцина, Россия, 620002, г. Екатеринбург, ул. Мира, 19; ORCID: 0009-0004-7129-3418; e-mail: v.o.serebrennikov@urfu.me

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

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Information about the authors

Yuri K. MALIKOV, Cand. Sci. (Eng.), Head of Research Center, Ural Federal University named after the First President of Russia B.N. Yeltsin, Mira St., 19, Ekaterinburg, 620002, Russian Federation; ID RISC: 134294; Scopus AuthorID: 6603995452; ORCID: 0009-0009-4334-7526; e-mail: uma66p@mail.ru

Aleksandr A. TITAEV, Cand. Sci (Eng.), Associate Professor, Ural Federal University named after the First President of Russia B.N. Yeltsin, Mira St., 19, Ekaterinburg, 620002, Russian Federation; ID RISC: 546224; Scopus AuthorID: 26649649000; ORCID: 0000-0002-3778-7033; e-mail: a.a.titaev@urfu.ru

Vyacheslav O. SEREBRENNIKOV, Master's Student, Ural Federal University named after the First President of Russia B.N. Yeltsin, Mira St., 19, Ekaterinburg, 620002, Russian Federation; ORCID: 0009-0004-7129-3418; e-mail: v.o.serebrennikov@urfu.me

Contribution of the authors: all authors made equivalent contributions to the publication.

The authors declare no conflict of interest.

Анализ корректности требований и методик для испытаний полиспастов, применяемых в системах индивидуальной защиты от падения с высоты в строительной отрасли

Дмитрий Александрович Корольченко ✉, Надежда Александровна Терех,
Дмитрий Александрович Простакишин

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

АННОТАЦИЯ

Введение. Согласно данным Министерства труда и социальной защиты РФ, ежегодно за период с 2018 по 2022 г. в организациях из общего количества несчастных случаев с тяжелыми последствиями доля несчастных случаев в результате падения при разности уровня высот и на глубину составила 23 %. Основными причинами этого являются несоблюдение правил по охране труда при работах на высоте, падение предметов с высоты, осознанное неприменение средств индивидуальной защиты (СИЗ) от падения с высоты, нарушение приемов работ на высоте, использование не по назначению СИЗ или неправильное использование компонентов страховочных систем, отсутствие средств коллективной защиты (ограждения, защитно-улавливающие сети).

Цель работы. Повышение безопасности при проведении спасательно-эвакуационных мероприятий пострадавшего, находящегося в подвешенном состоянии после падения, в средствах индивидуальной защиты от падения с высоты.

Задачи. 1. Рассмотреть процесс проведения сертификации полиспаста на соответствие требованиям ТР ТС 019/2011, используемые требования и методики, применяемые в проверке полиспастов. 2. Провести анализ корректности сертификации полиспаста при использовании стандартов для проверки качества изделия. 3. Экспериментальным путем определить запас прочности, динамической характеристики полиспаста. 4. Определить необходимые требования к полиспасту и разработать методики испытаний изделия для внедрения еще одного класса изделия в ГОСТ EN 1496–2020.

Аналитическая часть. В ходе работы проведен анализ группы стандартов, в соответствии с которыми в странах Таможенного Союза сертифицируются устройства для спасения и эвакуации. В статье также рассмотрен Европейский опыт сертификации и проверки технических требований к полиспастам.

Проведены разборы стандартов, применяемых для проверки технических требований ТР ТС 019/2011 на выявление недоработок и корректности применения методик.

Авторами были проведены исследовательские испытания полиспаста на различные характеристики с последующей разработкой требований и методик испытаний данных устройств.

Выводы. В процессе работы выработаны критерии требований с учетом особенностей полиспаста и разработаны методики проверки динамической и статической прочности. Реализована проверка функциональности свободного конца каната, используемого в полиспасте. Предложен термин, определяющий полиспаст, применяемый в системах спасения и эвакуации, а также позиционирования.

Ключевые слова: охрана труда; травма подвешенного состояния; системы спасения и эвакуации; полиспастные системы; несчастные случаи

Для цитирования: Корольченко Д.А., Терех Н.А., Простакишин Д.А. Анализ корректности требований и методик для испытаний полиспастов, применяемых в системах индивидуальной защиты от падения с высоты в строительной отрасли // Пожаровзрывобезопасность/Fire and Explosion Safety. 2024. Т. 33. № 3. С. 67–86. DOI: 10.22227/0869-7493.2024.33.03.67-86

✉ Корольченко Дмитрий Александрович, e-mail: ikbs@mgsu.ru

Analysis of requirements correctness and methods for testing of block pulley used in systems of individual protection against falling from height in construction industry

Dmitriy A. Korolchenko ✉, Nadezhda A. Tserakh, Dmitriy A. Prostakishin

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

ABSTRACT

Introduction. According to the Ministry of Labour and Social Protection of the Russian Federation, annually for the period from 2018 to 2022 in the organizations out of the total number of accidents with severe consequences, the share of accidents as a result of falling at height and depth differences was 23 %. The main reasons for this are non-compliance with the rules on labour protection when working at height, falling objects from height, conscious non-use of personal protective equipment (PPE) against falls from height, violation of work techniques at height, misuse of PPE or improper use of components of safety systems, lack of collective protection equipment (guardrails, safety catch nets).

Purpose. Increase of safety during rescue and evacuation measures of the victim, who is suspended after a fall, in the means of personal protection against falls from height.

Objectives. 1. To consider the process of the block pulley certification for compliance with the requirements of TR CU 019/2011, the requirements and methods used in the verification of the block pulley. 2. To analyze the correctness of the block pulley certification when using standards to verify the quality of the product. 3. To determine the safety margin, dynamic characteristics of the block pulley by experimentation. 4. To determine the necessary requirements for the block pulley and develop methods of testing the product to introduce another class of product in GOST EN 1496–2020.

Analytical part. The paper analyses the group of standards according to which rescue and evacuation devices are certified in the Customs Union countries. The paper also considers the European experience of certification and verification of technical requirements for the block pulley.

The standards used to verify the technical requirements of TR CU 019/2011 to identify deficiencies and correctness of methods were analyzed.

The authors conducted research tests of the block pulley for various characteristics with the subsequent development of requirements and test methods for these devices.

Conclusions. In the course of the work the criteria of requirements with regard to the characteristics of the block pulley and the methods of testing dynamic and static strength were developed. Functionality check of the free end of the rope used in the block pulley was realized. A term defining a block pulley used in rescue and evacuation and positioning systems was proposed.

Keywords: occupational health and safety; suspension injury; rescue and evacuation systems; block pulley systems; accidents

For citation: Korolchenko D.A., Tserakh N.A., Proskishin D.A. Analysis of requirements correctness and methods for testing of block pulley used in systems of individual protection against falling from height in construction industry, *Pozharovzryvobezopasnost/Fire and Explosion Safety*. 2024; 33(3):67-86. DOI: 10.22227/0869-7493.2024.33.03.67-86

✉ Dmitry Aleksandrovich Korolchenko, e-mail: ikbs@mgso.ru

Введение

Согласно данным Министерства труда и социальной защиты РФ, ежегодно, за период с 2018 по 2022 г. в организациях из общего количества несчастных случаев с тяжелыми последствиями доля несчастных случаев в результате падения при разности уровня высот и на глубину составила 23 %¹. Основными причинами этого являются несоблюдение правил по охране труда при работах на высоте, падение предметов с высоты, осознанное неприменение СИЗ от падения с высоты, нарушение приемов работ на высоте, использование не по назначению СИЗ или неправильное использование компонентов страховочных систем, отсутствие средств коллективной защиты (ограждения, защитно-улавливающие сети). Наибольшее количество несчастных случаев в результате падения при разности высот и на глубину было зафиксировано в Москве, Санкт-Петербурге и Свердловской области. Анализ несчастных случаев в разрезе хозяйственно-экономической дея-

тельности человека показывает, что лидером по количеству зафиксированных происшествий является сфера строительства. Доля строительства в разрезе экономической деятельности по количеству несчастных случаев в результате падения пользователей или предметов при разности высот и на глубину составляет 31,9 % (рис. 1).

По данным министерства труда, на строительной площадке каждый второй несчастный случай является результатом неудовлетворительной организации производства работ, а также допуска персонала, не прошедшего обучение безопасным приемам выполнения работ.

Строительные площадки являются наиболее травмоопасными с точки зрения риска падения с высоты, этому есть несколько объяснений:

- большое количество работ в строительстве производится на высоте или с местами, имеющими разности высот при выполнении работ, такие как монтаж строительных конструкций, ремонт крыш, окраска фасадов многоэтажных зданий и так далее [1];
- разнообразие рабочих платформ. Широко используются средства подмащивания, ограждения инвентарные, площадки и лестницы для строи-

¹ Министерство труда и социальной защиты Российской Федерации // Мониторинг условий и охраны труда. 2022. URL: <https://eisot.rosmintrud.ru/monitoring-usloviy-i-okhrany-truda> (дата обращения: 01.02.2024).

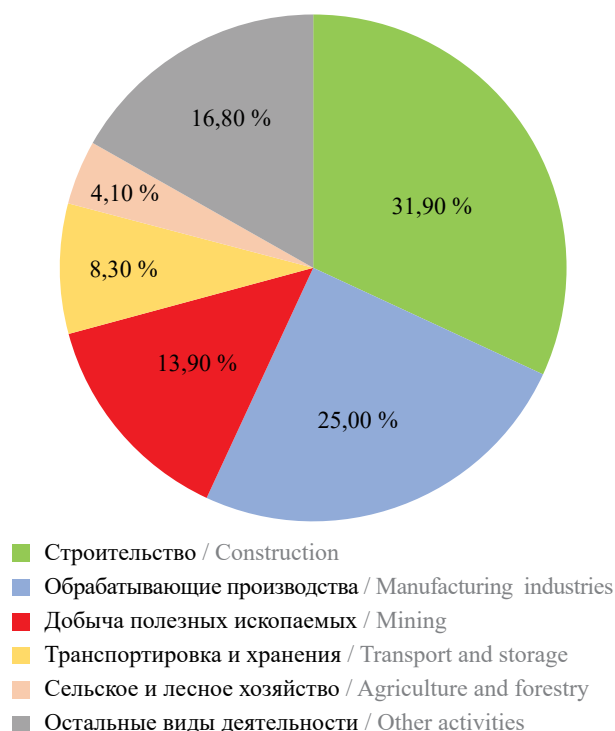


Рис. 1. Распределение несчастных случаев с тяжелыми последствиями в результате падения с высоты в разрезе экономической деятельности

Fig. 1. Distribution of accidents with severe consequences as a result of falling from height by economic activity

тельно-монтажных работ, подъемные устройства, подмости передвижные сборно-разборные и так далее; каждое из устройств требует правильной эксплуатации и соблюдения всех правил безопасности;

- динамичная природа условий работы. Строительство — динамично-движущийся процесс, работники бригады часто перемещаются с одной площадки на другую, меняются условия работы, что может усложнять соблюдение правил безопасности и координацию между рабочими;
- воздействие внешних факторов: отрицательные или очень высокие температуры, обледенение конструкций, ветровые воздействия. Все это может увеличить риски при работе на высоте;
- человеческий фактор [2]. Наличие множества подрядчиков, недобросовестное отношение к производству работ, желание сэкономить на обучении работников к соблюдению правил безопасности на высоте или же халатное отношение самих пользователей СИЗ — все это создает большие риски и увеличивает количество несчастных случаев [3];
- применение СИЗ низкого качества без сертификатов соответствия с целью уменьшения затрат на строительство.

Для обеспечения безопасности при выполнении работ на высоте работодатель использует средства

коллективной защиты (СКЗ) и средства индивидуальной защиты [4, 5]. В отличие от СИЗ от падения с высоты СКЗ от падения с высоты не подлежат обязательной сертификации, они носят рекомендательный характер, что в свою очередь добавляет процент опасной продукции на рынок защиты пользователя, в среду выполнения должных обязанностей с использованием правил работ на высоте.

Производители СИЗ от падения с высоты находятся в обязательных рамках подтверждения качества продукции перед выходом на рынок реализации, продукция должна соответствовать требованиям технического регламента стран Таможенного союза, чем гарантируется безопасность производимых изделий. Сертификация предлагает такие преимущества:

- фильтрация некачественной продукции;
- соблюдение приказа от 29 октября 2021 года № 766н Министерства труда и социальной защиты Российской Федерации «Об утверждении Правил обеспечения работников средствами индивидуальной защиты и смывающими средствами»;
- доверие потребителей. Сертификация повышает уровень доверия к изделию, работники и работодатели могут быть уверены в качестве, сроке службы и безопасности продукции.

Необходимо помнить, что даже сертифицированные СИЗ требуют правильной эксплуатации, регулярного обслуживания и использования в соответствии с инструкциями производителя [6]. Только при соблюдении всех этих условий можно обеспечить безопасность при работе на высоте.

Однако даже соблюдение всех правил эксплуатации, высокая квалификация работника в этом вопросе, периодические проверки изделий не могут обеспечить стопроцентное отсутствие травматизма. Всегда важно учитывать человеческий фактор, который может сработать абсолютно непредсказуемо, и с пользователем, прошедшим все инструктажи, может произойти нештатная ситуация с падением и зависанием в безопорном пространстве. При падении пользователь может получить ушибы, переломы или даже сотрясение, при этом остаться живым. Но одной из основных проблем после срыва человека является нахождение в подвешенном состоянии (рис. 2) [7–9].

Находясь в этом положении, пользователь может испытывать различные проблемные состояния, такие как:

- возможность удушья от неправильного положения при нахождении в страховочной привязи;
- компрессия мышц и тканей, которая происходит в процессе нахождение человека в туго обтягивающей его страховочной привязи;
- перегрев или охлаждение, которые происходят вследствие нарушения терморегуляции тела,



Рис. 2. Нахождение и процесс спасения пострадавшего в подвешенном состоянии

Fig. 2. Finding and the process of rescuing a victim in suspended animation

которая тесно связана с интенсивностью кровообращения;

- психологическая травма. В процессе падения и нахождения на высоте в беспомощном состоянии пострадавший способен испытать сильные эмоции, которые будут влиять на способность рационально мыслить и мешать спасению;
- нарушение работы системы кровообращения. В подвешенном состоянии ляжки страховочной привязи способны оказывать давление на нижние конечности пользователя в районе паха и работать как «венозный жгут», мешая оттоку крови.

Последняя проблема является наиболее опасной для пострадавшего, нарушение правильной циркуляции крови приводит к потере сознания, кислородному голоданию мозга, а в некоторых случаях даже смерти. В обычных условиях качать кровь сердцу помогают сокращения икроножных мышц, которые поднимают кровь. В подвешенном состоянии икроножные мышцы теряют возможность сокращения, а ляжки страховочной привязи пережимают вены, тем самым препятствуют току венозной крови к сердечной мышце, которая в таких условиях неспособна действовать самостоятельно. Далее начинается состояние гипоксии, когда мозг начинает получать недостаточно кислорода, для того чтобы решить эту

проблему мозг подает сигнал сердцу увеличить количество сердечных сокращений, что в свою очередь только ухудшает ситуацию и провоцирует накопление еще большего количества венозной крови в нижних конечностях — венозное депонирование. После этого начинается состояние, близкое к гиповолемическому шоку, критическому состоянию уменьшения объема артериальной крови вследствие большой кровопотери, однако, в отличие от него, кровопотери нет, а дефицит артериальной крови наблюдается из-за нарушения работы кровеносной системы.

В некоторых случаях пострадавший имеет возможность облегчить свое подвешенное состояние, например использование привязи со специальными петлями, которые могут использоваться как опоры или отталкивание от вертикальной стены. Однако не всегда есть возможность найти опору, а также имеет место быть потеря сознания пострадавшим. В таком случае следует сразу же переходить к спасательным действиям. В соответствии с приказом Министерства труда и социальной защиты РФ максимальный срок, отводимый на проведение спасательной операции после падения, составляет 10 мин.

Спасательная операция в беспорядочном пространстве очень сложная процедура — которая задействует заранее продуманный и утвержденный план спасательных работ, персонал, обладающий специальными навыками и приемами, и специальное снаряжение, требующее правильное использование — в количестве, превышающем при проведении работ, проводимых пользователем до происшествия (рис. 3) [10].

Одним из компонентов спасательных систем является полиспаст (рис. 4) — это специальное изделие, состоящее из подвижных и неподвижных блоков, связанных канатом, снабжающимся опционально блокирующим устройством, в комплексе дающим получение выигрыша в силе или скорости передвижения груза или пострадавшего [11].

При работах на высоте данное изделие имеет очень важную роль в системе спасения, в функционал которого входит подъем или спуск на небольшое расстояние с целью разгрузить заблокированные устройства для позиционирования с рабочими или страховочных перил, или спозиционировать пострадавшего в безопасное место для оказания помощи.

Полиспаст является очень сложным механизмом, который участвует в оптимизации процесса спасения, и при этом не имеет отдельный тип (класс) изделия или свой стандарт, включающий требования к изделию и методы проверки изделия. В данной статье будут рассмотрены вопросы сертификации, применимость методик других стандартов и изложена проблематика использования методик, предложен и обоснован вариант корректировки методики испытаний.



Рис. 3. Пример спасения пострадавшего с помощью системы, содержащей полиспаст

Fig. 3. Example of rescuing a victim using a system containing the block pulley

Целью исследования является повышение безопасности при проведении спасательно-эвакуационных мероприятий пострадавшего, находящегося в подвешенном состоянии после падения в средствах индивидуальной защиты от падения с высоты. Поставленные задачи: рассмотреть процесс проведения сертификации полиспаста на соответствие требованиям ТР ТС 019/2011², используемые требования и методики, применяемые в проверке полиспастов; провести анализ корректности сертификации полиспаста при использовании стандартов для проверки качества изделия; экспериментальным путем определить запас прочности, динамической характеристики полиспаста; определить необходимые требования к полиспасту и разработать методики испытаний изделия для внедрения еще одного класса изделия в ГОСТ EN 1496–2020³.

² ТР ТС 019/2011. Технический регламент Таможенного союза. О безопасности средств индивидуальной защиты.

³ ГОСТ EN 1496–2020. Система стандартов безопасности труда. Средства индивидуальной защиты от падения с высоты. Устройства спасательные подъемные. Общие технические требования. Методы испытаний.



Рис. 4. Полиспаст

Fig. 4. Block pulley

Аналитическая часть

Полиспаст

Полиспаст является системой из нескольких подвижных и неподвижных блоков, работа которой рассчитана на выигрыш в подъемной скорости или силе [12]. Устройство позволяет разгрузить строп, используемый пользователем, дает возможность спасателем использовать устройство для спуска и эвакуировать пользователя в безопасное место.

В основные параметры, влияющие на эффективность полиспастов, входит: кратность полиспаста и коэффициент полезного действия полиспаста (КПД в полиспастных системах — физическая величина, равная отношению расчетного выигрыша в подъемной силе, к затраченной фактически силе подъема) [13]. Теоретическое усилие всегда отличается от фактического, например, для испытываемого полиспаста кратность, согласно данным от производителя, будет равняться 4:1, это значит, что теоретически, для того чтобы поднять груз массой 100 кг, надо приложить усилие 245,2 Н, или подвесить на свободный конец стропа груз массой 25 кг (рис. 5). Однако на практике из-за трения, видов применяемых подшипников фактическое усилие может быть на 10–50 % выше теоретического. Для того чтобы поднять груз массой 100 кг данным полиспастом, нужно приложить усилие 343,2 Н. Таким образом, каждый случай применения полиспаста является индивидуальным, ведь сила трения может изменяться в зависимости от материала используемой веревки, ее диаметра и КПД используемого блок-ролика, влажности воздуха, воздействия коррозионного тумана и других факторов [14].

Данный параметр как фактический показатель КПД является важной характеристикой при подборе комплекта спасения. Производители прописывают кратность полиспаста, что говорит лишь о теоретическом выигрыше в силе подъема. При этом отсутствует методика проверки данной характеристики с допустимым коэффициентом КПД на кратность полиспаста, что может вводить пользователя в заблуждение.

Сертификация изделия

На сегодняшний день средства индивидуальной защиты от падения с высоты подлежат обязательной сертификации. Процесс варьируется в зависимости от региона, существуют разные технические регламенты, действующие в определенной стране



Рис. 5. Испытания полиспафта
Fig. 5. Testing of the block pulley

или группе стран. Например, для регуляции производства и сертификации в Российской Федерации, и всех странах Таможенного союза действует ТР ТС 019/2011², принятый 9 декабря 2011 года комиссией Таможенного союза.

Сертификация СИЗ от падения с высоты — трудоемкий процесс, целью которого является подтверждение соответствия устройств обязательным требованиям законодательства в области технического регулирования. В ходе сертификации орган по сертификации, выбранный производителем, подтверждает или опровергает соответствие средства индивидуальной защиты требуемым характеристикам [15].

Сертификация СИЗ от падения с высоты — важнейший этап проверки качества продукции, напрямую обеспечивающий в дальнейшем комфорт пользования продукцией и безопасности жизни пользователя. Средство индивидуальной защиты от падения с высоты при правильной эксплуатации должно срабатывать в 100 % случаев и минимизировать получения травм пользователем. Сертификация — процесс проверки и подтверждения технических требований к продукции, который выполняется в сопровождении Органа по сертификации продукции (ОС) и Испытательной лаборатории (ИЛ) по проверке качества продукции.



В ответственность ОС входит:

- анализ состояния производства, целью которого является проверка у изготовителя условий, гарантирующих стабильный выпуск качественной продукции в соответствии с требованиями к данному виду, подтверждаемыми при сертификации продукции;
- отбор проб (изделий) для проверки в испытательной лаборатории;
- выдача сертификата соответствия;
- ежегодный инспекционный контроль при серийном выпуске продукции под знаком качества сертификата соответствия.

В обязанность ИЛ входит:

- беспристрастная проверка функциональности и конструктивного исполнения;
- проверка статической и динамической прочности изделия;
- проверка термостойкости в среде низких-высоких температур;
- устойчивость к светопогодным условиям, сопротивляемость к соляному туману;
- токсиколого-гигиеническая оценка безопасности и ряд других тестов, определяющих качество продукции [16].

Все эти меры обеспечивают юридическую и физическую безопасность конечного потребителя,

который, приобретая сертифицированную продукцию, может быть уверен, что в нужный момент средство индивидуальной защиты от падения с высоты будет функционировать правильно. Полиспаст чаще всего применяется в операциях по спасению пострадавших, находящихся в подвешенном состоянии после падения, при разности высот и на глубину.

В системе подтверждения соответствия требований Технического регламента Таможенного союза 019/2011² отсутствует в части методов и требований международный или национальный стандарт, включающий в себя как класс или как самостоятельное устройство полиспаст. Зарубежный опыт нам говорит об отсутствии отдельной стандартизации изделия как полиспаст. Полиспаст рассматривается не как целостное изделие, а совокупность оных: шкив, зажим альпинистский, канат с сердечником низкого растяжения или динамическая веревка, соединительные элементы. Такой подход в нашей системе сертификации не подходит по ряду причин:

1) все средства индивидуальной защиты от падения с высоты, имеющие свою область применения как самостоятельные изделия, свой артикул на изделие, должны пройти подтверждение соответствия минимальным требованиям ТР ТС 019/2011²;

2) для СИЗ от падения с высоты определены области применения, конструктив и функциональные характеристики, которым они должны соответствовать. Разбирая по элементам систему спасения (полиспаст), мы уходим от прямого назначения системы и увеличиваем риски безопасности применения устройства для спасения. Пример: функция соединительного элемента отдельно и функционал собранного полиспаста отличаются, и отсутствие ограничителя на канате в виде узла или концевой заделки может привести к разрушению и высвобождению каната в системе полиспаста с последующим падением соединительного элемента с блок-роликом полиспаста.

В данном случае присутствует фактор, препятствующий сертификации изделия в комплексе. На сегодняшний момент в Таможенном союзе отсутствует тип или класс устройства или стандарт на полиспасты. В зависимости от оценки эксперта, идентификации и трасировки изделия сертифицируют по ряду стандартов:

- ГОСТ EN 1496–2014. Межгосударственный стандарт. Система стандартов безопасности труда. Средства индивидуальной защиты от падения с высоты. Устройства спасательные подъемные. Общие технические требования. Методы испытаний;
- ГОСТ EN 1496–2020. Межгосударственный стандарт. Система стандартов безопасности труда. Средства индивидуальной защиты от падения

с высоты. Устройства спасательные подъемные. Общие технические требования. Методы испытаний;

- ГОСТ EN 354–2019. Система стандартов безопасности труда. Средства индивидуальной защиты от падения с высоты. Стропы. Общие технические требования. Методы испытаний;
- ГОСТ Р ЕН 354–2010. Система стандартов безопасности труда. Средства индивидуальной защиты от падения с высоты. Стропы. Общие технические требования. Методы испытаний;
- ГОСТ Р ЕН 795–2014. Система стандартов безопасности труда. Средства индивидуальной защиты от падения с высоты. Устройства анкерные. Общие технические требования. Методы испытаний;
- ГОСТ EN 795–2019. Система стандартов безопасности труда. Средства индивидуальной защиты от падения с высоты. Устройства анкерные. Общие технические требования. Методы испытаний;
- ГОСТ Р ЕН 358–2008. Система стандартов безопасности труда. Средства индивидуальной защиты от падения с высоты. Привязи и стропы для удержания и позиционирования. Общие технические требования. Методы испытаний;
- ГОСТ EN 358–2021. Система стандартов безопасности труда. Средства индивидуальной защиты от падения с высоты. Привязи и стропы для удержания и позиционирования. Общие технические требования. Методы испытаний.

Данные стандарты не включают в область применения изделия полиспаст, применяемый в спасательных работах и напрямую участвующий в цепи системы эвакуации пострадавшего. В данной работе предстоит разобраться в вопросах корректности применения данных стандартов.

Полиспаст в странах Таможенного союза рассматривается как средство индивидуальной защиты от падения с высоты и сертифицируется как устройство спасательное подъемное с дополнительной функцией опускания человека ручным управлением (ГОСТ EN 1496–2014 — класс В или ГОСТ EN 1496–020), однако на практике присутствует сертификация полиспаста как анкерного устройства класса В (ГОСТ EN 795–2019 или ГОСТ Р ЕН 795–2014), стропа (ГОСТ EN 354–2019 или ГОСТ Р ЕН 354–2010), или привязи и стропы для удержания и позиционирования (ГОСТ Р ЕН 358–2008 или ГОСТ EN 358–2021) (рис. 6).

Проведение испытаний

При сертификации по ГОСТ EN 1496³ проблемы обнаруживаются во время проведения проверки динамической рабочей характеристики спасательного подъемного устройства [17–19]. Во время подготовки к проведению испытания мы обязаны следовать требованию из стандарта: «из спасательного подъемного

устройства вытягивают строп на 4000 мм и прикрепляют груз с испытательной массой А на окончании стропа, включая измерительный прибор для измерения силы торможения».

В этом и заключается первая проблема, при испытании более типичных для этого стандарта изделий, например лебедок, формулировка точная и понятная. Однако при проведении испытания полиспаста, возникают вопросы:

1) полиспасты имеют различные длины и строение, во многих случаях вытянуть полиспаст на 4000 мм не получится;

2) нет понимания, как добиться длины 4000 мм: вытягивать свободный конец стропа или вся длина изделия должна составить 4000 мм.

Таким образом, при проведении динамического испытания с вытягиванием свободного конца может увеличиваться фактор падения, а следовательно, и нагрузка на изделие, что может негативно влиять на объективность показателей.

Фактор рывка (падения) — геометрический показатель, характеризующий относительную нагрузку на систему страховки альпиниста при срыве. Определяют как отношение высоты падения к длине альпинистской веревки, используемой для остановки падения [20].

Полиспаст является устройством, обладающим ручной функцией опускания, с возможностью вручную контролировать его скорость, что определяет полиспаст как устройство спасательное подъемное

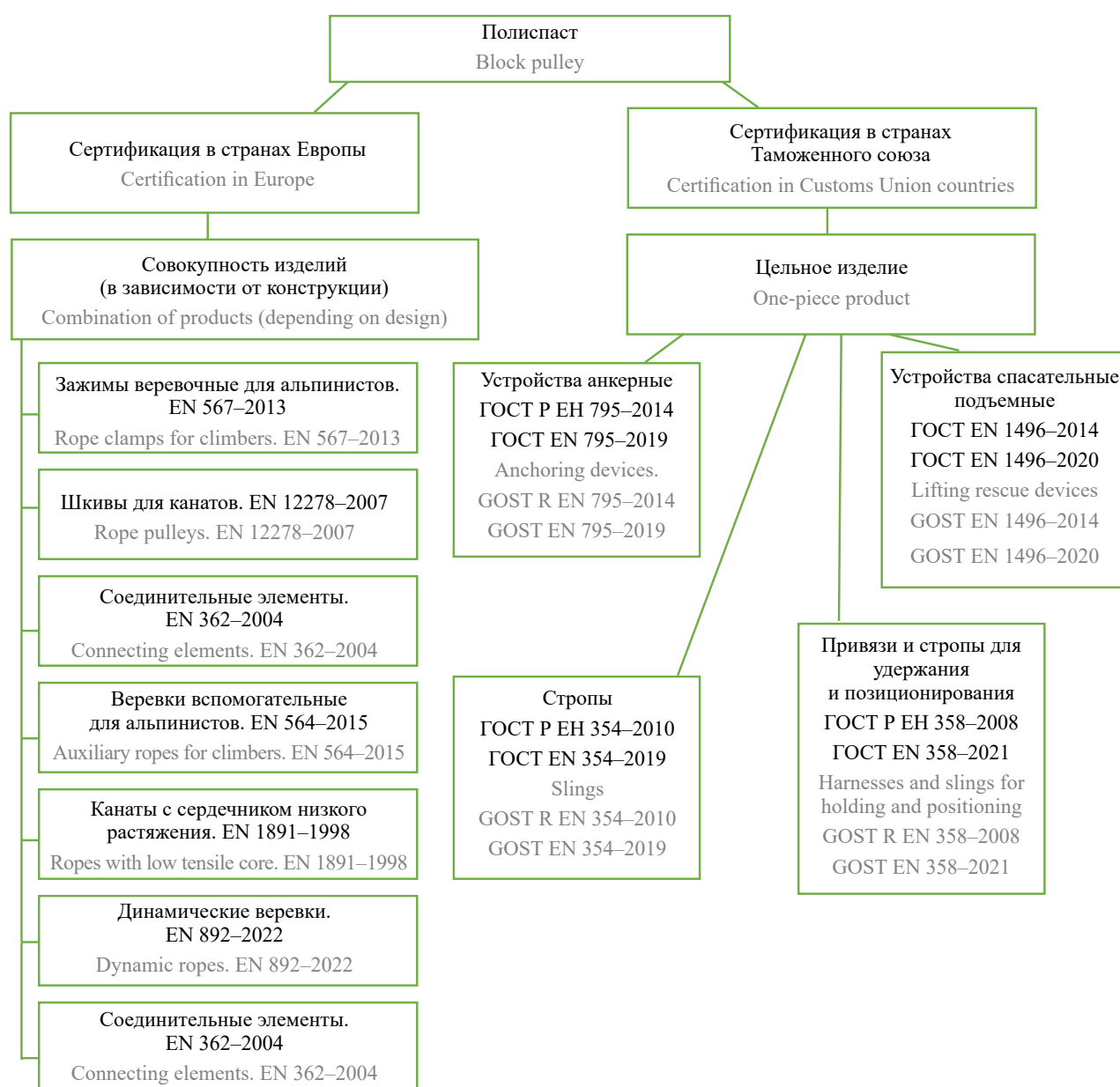


Рис. 6. Схема видов процессов сертификации полиспаста в Евросоюзе и Таможенном союзе

Fig. 6. Schematic diagram of types of the block pulley certification processes in the European Union and the Customs Union

с дополнительной функцией опускания человека ручным управлением класса В. Это создает дополнительное требование к динамической характеристике: «при испытании по 5.6 испытательная масса должна быть эквивалентна максимальной расчетной нагрузке, но не менее 100 кг, а сила торможения $F_{\max}$ не должна превышать 6 кН».

Для подтверждения наличия данной проблемы были проведены испытания статической прочности и динамической характеристики (рис. 7, 8) при падении испытательного груза массой 100 кг (табл. 1). Для оценки результатов в рамках испытаний использовался критерий значения максимальной силы торможения — проверка воздействия создаваемых нагрузок на человека (рис. 9).

В дополнение одним из критериев несостыковки является прописанная в инструкция по эксплуатации рабочая нагрузка для полиспастов разных производителей: PETZL устройство JAG SYSTEM — 6 кН, Climbing Technology устройство UP YOU GO — 4 кН, CAMP устройство OYSSA — 120 кг, Венто — устройство полиспаст ПИТОН — 300 кг — при испытании на динамическую и статическую прочность будет использована максимальная рабочая нагрузка на полиспаст в соответствии с методикой испытаний. В данном случае нагрузки возрастут до 60 кН при испытании на статическую прочность и повысится максимальное пиковое усилие при динамическом тесте.



Рис. 7. Положение полиспаста при испытании статической прочности
Fig. 7. Position of the block pulley during the static strength test



Рис. 8. Положение полиспаста при испытании динамической рабочей характеристики
Fig. 8. Position of the block pulley when testing the dynamic operating characteristic

Таблица 1. Проверка статической прочности и динамической рабочей характеристики полиспаста в соответствии с ГОСТ EN 1496–2014

Номер пункта Number	Требование Requirement	Полученные значения нагрузки Load values obtained
4.6. Прочность при статической нагрузке 4.6. Static load strength	При испытании по 5.7 с тестовой силой, эквивалентной 10-кратной максимальной расчетной нагрузке, но не менее 12 кН, спасательное подъемное устройство должно выдерживать приложенную силу в течение 3 мин без образования трещин или разрывов When tested according to 5.7 with a test force equivalent to 10 times the maximum design load, but not less than 12 kN, the liferaft shall withstand the applied force for 3 min without cracking or breaking	$F = 12,3$ кН в течение 3 мин. Неопределенность по нагрузке составила 1,2 % при $P_d = 0,95$. Неопределенность измерений времени не превышает 1,0 % при $P_d = 0,95$ $F = 12.3$ kN for 3 min. The uncertainty in the load was 1.2 % at $P_d = 0.95$. The uncertainty of time measurements does not exceed 1.0 % at $P_d = 0.95$
4.5. Динамическая рабочая характеристика и назначение спасательного подъемного устройства класса В 4.5. Dynamic operating characteristic and purpose of class B rescue hoisting device	При испытании по 5.6 испытательная масса должна быть эквивалентна максимальной расчетной нагрузке, но не менее 100 кг, а сила торможения $F_{\max}$ не должна превышать 6 кН When tested according to 5.6, the test mass shall be equivalent to the maximum design load, but not less than 100 kg, and the braking force $F_{\max}$ shall not exceed 6 kN	$F_{\max} = 11,9$ кН — пиковая нагрузка. Неопределенность по нагрузке составила 2,2 % при $P_d = 0,95$ $F_{\max} = 11.9$ kN — peak load. The uncertainty in the load was 2.2 % at $P_d = 0.95$

Примечание. Длина полиспаста, применяемая для испытаний — 1 м.
Note. The length of the block pulley used for testing is 1 m.

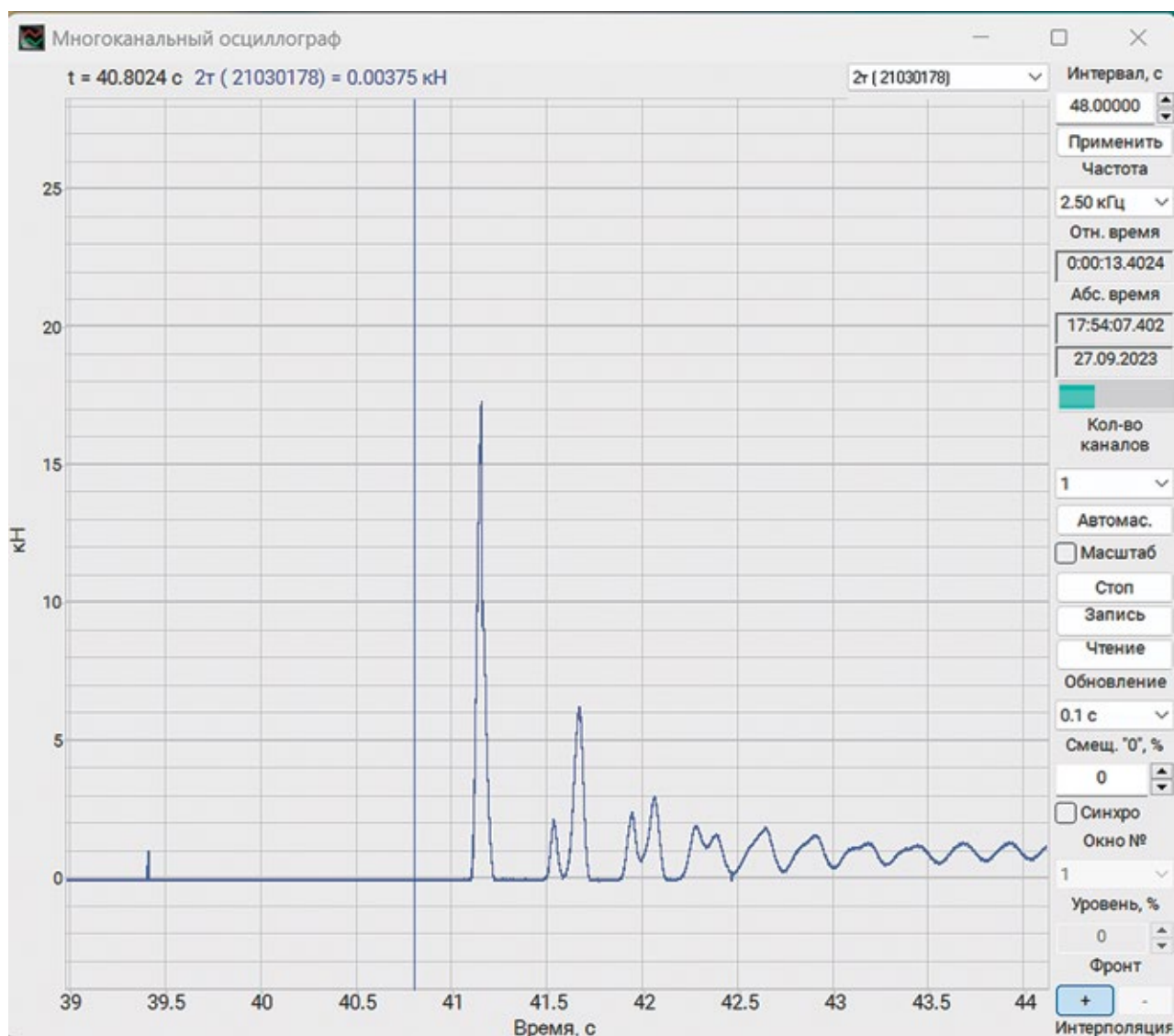


Рис. 9. График изменения силы торможения во время проведения испытания динамической рабочей характеристики
Fig. 9. Graph of braking force variation during the dynamic operating characteristic test

Таким образом, мы видим, что полиспасть не отвечает требованиям EN 1496², при прохождении процесса сертификации объективно качественное устройство при всех своих преимуществах для проведения спасательных операций не сможет пройти все этапы и выйти на рынок, так как требования стандарта неуместны для дальнейшего применения. Одним из решений видится авторам вынесение полиспадов в отдельный класс устройств спасательных подъемных с функцией опускания на расстояние до 2 метров, без предъявления требования к максимальной силе торможения.

Полиспасть — это инструмент для спасения и эвакуации пострадавшего, который всегда находится в нагруженном состоянии без провиса рабочих ветвей полиспада, что сводит на минимум риски

возникновения динамических рывков. Применение полиспадов в системе остановки падения является некорректным. В дополнение в полиспадах отсутствует демфирующее устройство для снижения нагрузки при рывке, что также повышает динамическую нагрузку на элементы полиспада и пользователя. Динамическая характеристика в данном случае не играет важной роли и создает дополнительные трудности при испытаниях. Однако динамическая прочность — важнейший параметр проверки, позволяющий увидеть слабые места в конструкции изделия, она является критерием проверки прочности в дополнение к статическим испытаниям.

Применение методик из ГОСТ EN 795–2019 для испытаний полиспадов

В табл. 2 приведены результаты апробации методики ГОСТ EN 795–2019 на динамическую прочность

и целостность и испытание статической нагрузкой. В процессе испытания на динамическую прочность и целостность изделие используется не по своему прямому применению, а как анкерное устройства (типа В).

Обратимся к области применения данного стандарта: «Настоящий стандарт устанавливает технические требования и соответствующие методы испытаний для анкерных устройств, предназначенных для использования одним человеком, которые могут быть демонтированы со структуры. Данные анкерные устройства включают в свою конструкцию стационарную или перемещаемую (мобильную) анкерную точку, сконструированную для присоединения компонентов системы индивидуальной защиты от падения с высоты в соответствии с EN 363». Полиспаст не является анкерным устройством и применяется при спасательных работах в паре со спасательным комплектом. При подъеме пострадавшего вероятность падения с высоты сводится к минимуму. В данном случае идет расхождение в области применения и отсутствуют функциональные проверки, применимые к полиспастам.

Анализ применимости методик испытаний из стандартов ГОСТ Р EN 358–2008, ГОСТ EN 358–2021

Анализ стандартов показал, что область их применения распространяется на общие технические требования, методы испытаний, маркировку и информацию, предоставляемую изготовителем для привязей и стропов, предназначенных для рабочего позиционирования и ограничения движения.

Например, при идентификации изделия: Производитель: **Petzl**, модель: **JAG SYSTEM** полиспаст имеет признаки стропа для позиционирования и удержания (рис. 10):

- присутствует элемент регулирования длины стропа (полиспаста);
- присутствуют элементы крепления для соединения устройства для удержания тела с анкерной точкой.

Применение полиспаста в соответствии ГОСТ Р EN 358–2008, ГОСТ EN 358–2021 допустимо, не противоречит применению стропа для удержания или позиционирования пользователя. В данном случае применение полиспаста в таком исполнении будет являться второстепенной функцией после пря-

Таблица 2. Проверка статической прочности и динамической прочности и целостности полиспаста
Table 2. Checking static strength and dynamic strength and integrity of the block pulley

Номер пункта Number	Требование Requirement	Полученные значения нагрузки Load values obtained
4.4.2.2. Испытание на динамическую прочность и целостность 4.4.2.2. Dynamic strength and integrity test	При испытании в соответствии с 5.4.3 (испытание на динамическую прочность и целостность) анкерное устройство должно удерживать жесткий испытательный груз таким образом, чтобы он не касался земли When tested in accordance with 5.4.3 (dynamic strength and integrity test), the anchoring device shall hold a rigid test weight in such a way that it does not touch the ground	$F_{\max} = 9,2$ кН — пиковая нагрузка, далее полиспаст был нагружен до 300 кг в течение 3 мин. Неопределенность по нагрузке составила 2,7 % при $P_d = 0,95$. Неопределенность измерений времени не превышает 1,0 % при $P_d = 0,95$ $F_{\max} = 9.2$ kN was the peak load, then the block pulley was loaded to 300 kg for 3 min. The uncertainty of the load was 2.7 % at $P_d = 0.95$. The uncertainty of the time measurement does not exceed 1.0 % at $P_d = 0.95$
4.4.2.3. Испытание статической прочности 4.4.2.3. Static strength test	При испытании в соответствии с 5.4.4 (испытание статической прочности) анкерное устройство должно выдерживать нагрузку When tested according to 5.4.4 (static strength test), the anchoring device shall be able to withstand the load	$F = 19$ кН в течение 3 мин. Неопределенность по нагрузке не превышает 1,0 % при $P_d = 0,95$. Неопределенность измерений времени не превышает 1,0 % при $P_d = 0,95$ $F = 19$ kN for 3 min. The load uncertainty does not exceed 1.0 % at $P_d = 0.95$. Time measurement uncertainty does not exceed 1.0 % at $P_d = 0.95$

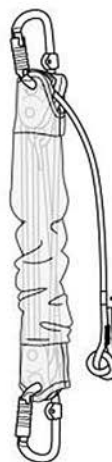
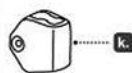
Примечание. Длина полиспаста, применяемая для испытаний — 1 м.
Note. The length of the block pulley used for testing is 1 m.

6.

Регулируемый строп для рабочего позиционирования
Adjustable sling for working positioning

EN 358 : 2018

Прослеживаемость
и маркировка
Traceability and labelling



k.
l.
j.
r.
q.
a.
b.
e.
s.
c.
p.

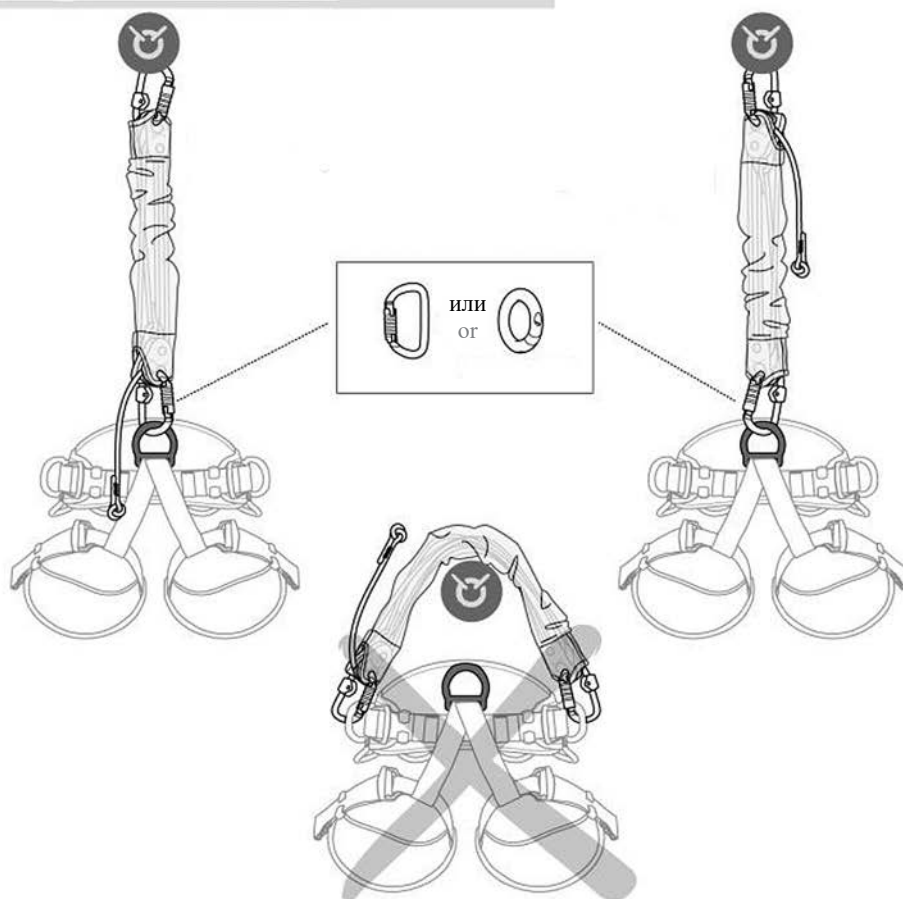


Рис. 10. Производитель: **Petzl**, модель: **JAG SYSTEM**. Область применения полиспаста в соответствии с EN 358. Привязи и стропы для удержания и позиционирования

Fig. 10. Manufacturer: **Petzl**, model: **JAG SYSTEM**. Scope of application of the block pulley according to EN 358. Harnesses and slings for holding and positioning

мого назначения полиспаста в системах спасения или эвакуации. Сертификация полиспаста в рамках данных стандартов расширяет границы применения и дает возможность изменять положение в безопасном пространстве пользователя и применять полиспаст в эвакуации пострадавшего, присоединяя его к себе и регулируя его положение относительно друг друга.

Критерии, не учитывающие конструкцию полиспастов

Отсутствует проверка усилия регулирования стропа при максимальной рабочей нагрузке, заявленной изготовителем. Проверка этого параметра является очень важным критерием. Пример: при заявленной рабочей нагрузке устройства в 300 кг КПД полиспаста должно быть таким, чтобы один пользователь с усилием, не превышающим 250 Н, смог отрегулировать строп для уменьшения или увеличения длины — позиционирования себя или пострадавшего (рис. 11). Но в области стандарта

отсутствует применение изделий в рамках спасательных или эвакуационных мероприятий.

Анализ применимости методик испытаний из стандартов ГОСТ Р EN 354–2010, ГОСТ EN 354–2019

Область применения стандартов ГОСТ Р EN 354–2010, ГОСТ EN 354–2019 устанавливает общие технические требования, методы испытаний, требования к маркировке, упаковке и информации, предоставляемой изготовителем для стропов. Стропы, соответствующие настоящему стандарту, используются в качестве элементов или компонентов для соединения в системах индивидуальной защиты от падения с высоты (т.е. в удерживающих системах, системах позиционирования на рабочем месте, системах канатного доступа, в страховочных и спасательных системах) [21].

Стандарт распространяется на стропы без регулятора длины и с устройством регулирования длины. При наличии регулятора длины изделие

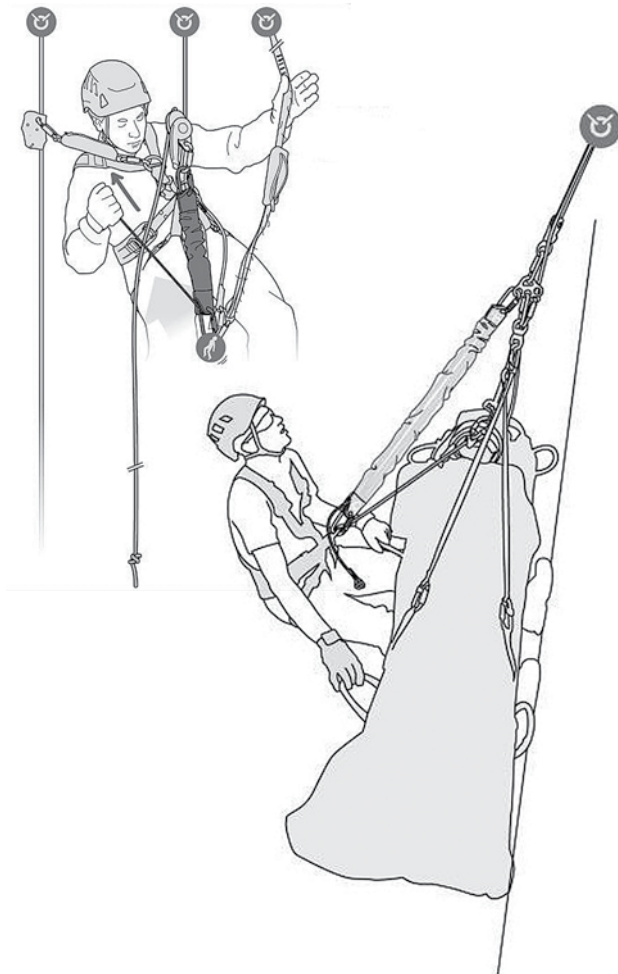


Рис. 11. Варианты применения полиспаста в рамках стропа для позиционирования

Fig. 11. Options for using the block pulley as part of a positioning sling

дополнительно подлежит прохождению тестирования на динамическую прочность без учета динамической характеристики. В данном случае требования, изложенные в стандарте, не противоречат в применении полиспаста как стропа для позиционирования и удержания.

Критерии, не учитывающие конструкцию полиспастов:

- отсутствует проверка усилия регулирования стропа при максимальной рабочей нагрузке, заявленной изготовителем;
- критерий статической прочности для полиспаста в 22 кН может не учитывать полиспасты легкой конструкции.

Исследовательские испытания на статическую и динамическую прочность (характеристику) изделий

Были проведены испытания полиспаста на предельные пиковые нагрузки и минимально разрушающую нагрузку в зависимости от фактора применения полиспаста. Эксперимент проведен в качестве оценки выявления слабых мест, выработки критериев требований к проверке на прочность и осознанных реальных показателей для включения их в методики испытаний [22].

Проверка динамической прочности и выявления динамических характеристик при факторах падения 1 и 2 показана на рис. 12, 13. Фактор падения и максимальная сила торможения при падении являются прямо пропорциональными величинами: чем больше фактор падения, тем больше нагрузка на систему. Данные тесты подтверждают, что использование полиспастов в системе остановки падения некорректно в связи с возникновением высоких пиковых нагрузок (табл. 3).

В ходе испытаний были выявлены возможные сценарии разрушения полиспаста:

- обрыв веревки в связи повышенной нагрузкой и агрессивного кулачкового зажима (рис. 14, а);
- отгибание щечки в связи с повышенной нагрузкой и прохождением концевой заделки через щечки блоков (рис. 14, б);
- проскальзывание веревки через блок-ролик в связи с повышенной нагрузкой и непредусмо-

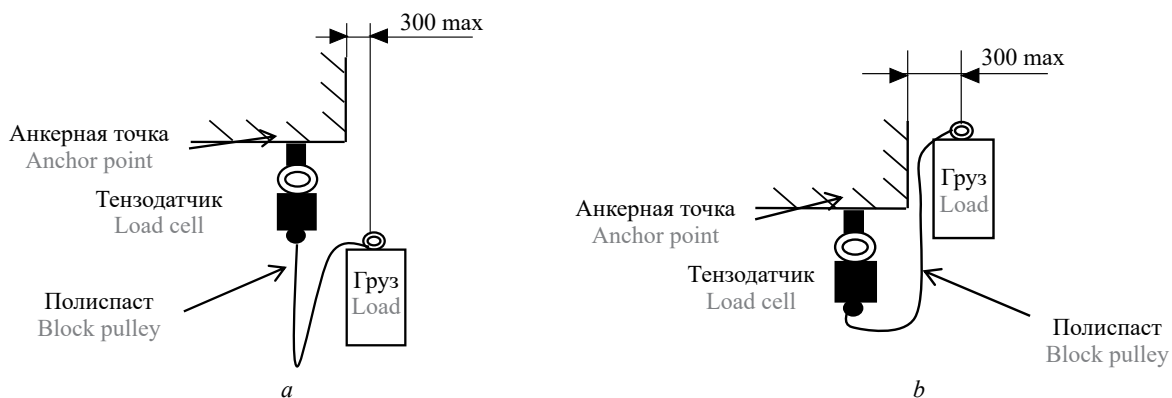


Рис. 12. а — ff (фактор падения) = 1; б — ff (фактор падения) = 2

Fig. 12. а — ff (fall factor) = 1; б — ff (fall factor) = 2

Таблица 3. Результаты испытаний полиспаста на предельные пиковые нагрузки и минимально разрушающую нагрузку в зависимости от фактора применения полиспаста

Table 3. Results of block pulley tests for ultimate peak loads and minimum breaking load depending on the block pulley application factor

Проверяемая характеристика Tested characteristic	Методика Methodology	Полученные значения нагрузки Load values obtained
Динамическая прочность и динамическая характеристика Dynamic strength and dynamic characterization	Сброс груза массой 100 кг с фактором падения 1, полиспаст заблокирован Dropping a 100 kg load with fall factor 1, block pulley blocked	Изделие выдерживает падение груза массой 100 кг с фактором падения 1. Пиковая нагрузка $F = 17,08$ кН. Неопределенность по нагрузке составила 1,1 % при $P_d = 0,95$ The product withstands a 100 kg drop with fall factor 1. Peak load $F = 17.08$ kN. The uncertainty in the load was 1.1 % at $P_d = 0.95$
	Сброс груза массой 100 кг с фактором падения 1, полиспаст разблокирован Dropping a 100 kg load with fall factor 1, block pulley unblocked	Изделие выдерживает падение груза массой 100 кг с фактором падения 1. Пиковая нагрузка $F = 17,36$ кН. Неопределенность по нагрузке составила 1,1 % при $P_d = 0,95$ The product withstands a 100 kg drop with fall factor 1. Peak load $F = 17.36$ kN. The uncertainty in the load was 1.1 % at $P_d = 0.95$
	Сброс груза массой 100 кг с фактором падения 2, полиспаст заблокирован Dropping a 100 kg load with fall factor 2, block pulley blocked	Изделие выдерживает падение груза массой 100 кг с фактором падения 2. Пиковая нагрузка $F = 21,85$ кН. Неопределенность по нагрузке составила 1,0 % при $P_d = 0,95$ The product can withstand a 100 kg drop with fall factor 2. Peak load $F = 21.85$ kN. The uncertainty in the load was 1.0 % at $P_d = 0.95$
	Сброс груза массой 100 кг с фактором падения 2, полиспаст разблокирован Dropping a 100 kg load with fall factor 2, block pulley unblocked	Изделие выдерживает падение груза массой 100 кг с фактором падения 2. Пиковая нагрузка $F = 22,76$ кН. Неопределенность по нагрузке составила 1,0 % при $P_d = 0,95$ The product withstands a 100 kg drop with fall factor 2. Peak load $F = 22.76$ kN. The uncertainty in the load was 1.0 % at $P_d = 0.95$
Статическая минимально разрушающая нагрузка Static minimum breaking load	Приложение статической нагрузки до разрушения Application of static load before fracture	Первое испытание: произошел обрыв веревки в зоне кулачкового зажима + отгибание щеки на 21,7 кН. Второе испытание: произошел обрыв веревки на 24,0 кН. Максимальная неопределенность по нагрузке составила 1,5 % при $P_d = 0,95$. Неопределенность измерений времени не превышает 1,0 % при $P_d = 0,95$ First test: rope breakage in the cam clamp area + cheek bending at 21.7 kN. Second test: rope breakage of 24.0 kN occurred. The maximum uncertainty in the load was 1.5 % at $P_d = 0.95$. The uncertainty of time measurements does not exceed 1.0 % at $P_d = 0.95$

тренной концевой заделкой большего диаметра или дополнительного ограничителя (рис. 14, с). Исходя из результатов испытаний, можно сделать несколько выводов:

- положение стопорного кулачка при проведении динамических испытаний практически не влияет на нагрузку, значения максимальной силы торможения больше на 2–4 % при разблокированном полиспасте, при этом возникает критерий проверки концевой заделки при открытом стопорном кулачке (зажиме). Концевая заделка

не должна пройти через блок устройства, данный параметр напрямую показывает безопасность полиспаста. В случае прохождения концевой заделки через блок произойдет каскадное разрушение полиспаста с последующим высвобождением соединительных элементов;

- изделие имеет запас прочности, способно выдерживать критические статические и динамические нагрузки. Минимально-разрушающая нагрузка для применяемых соединительных элементов 20 кН, каждая ветвь каната полис-



Рис. 13. Падение с факторами 1 (а) и 2 (b)
Fig. 13. Fall factors 1 (a) and 2 (b)

паста увеличивает кратно прочность соединительного каната в устройстве, стопорный кулачек (зажим) воспринимает распределенную нагрузку от ветвей каната;

- при использовании с фактором применения 1, 2 пиковое усилие оказывается за пределами допустимых динамических характеристик в 6 кН. Применение полиспаста в системах остановки падения не применимо. Данное устройство по своему применению должно работать в системах спасения и эвакуации или для удержания пользователя, исключая (запрещая) применение не по назначению.

Необходимые минимальные требования и разработка методов проверки на основании области применения и проведенных исследовательских тестов. Дополнение требований и методик в стандарт ГОСТ EN 1496–2020

Предлагается ввести новый термин, определяющий класс устройство и его предназначение.

Спасательное подъемное устройство класса С (rescue lifting device class C) — спасательное подъемное устройство, имеющее дополнительную функцию ручного спуска человека на расстояние в пределах до 5 м, например, для того, чтобы обойти препятствие. Устройство представляет собой полиспаст из подвижных и неподвижных блоков, объединенных канатом и зажимом для фиксации.

Ввести требования к методике испытаний нового класса устройств.

1. Динамическая прочность и функционирование для устройств класса С

Требование: при испытании масса испытательного груза должна быть эквивалентной максимальной номинальной нагрузке, но быть не менее 100 кг.

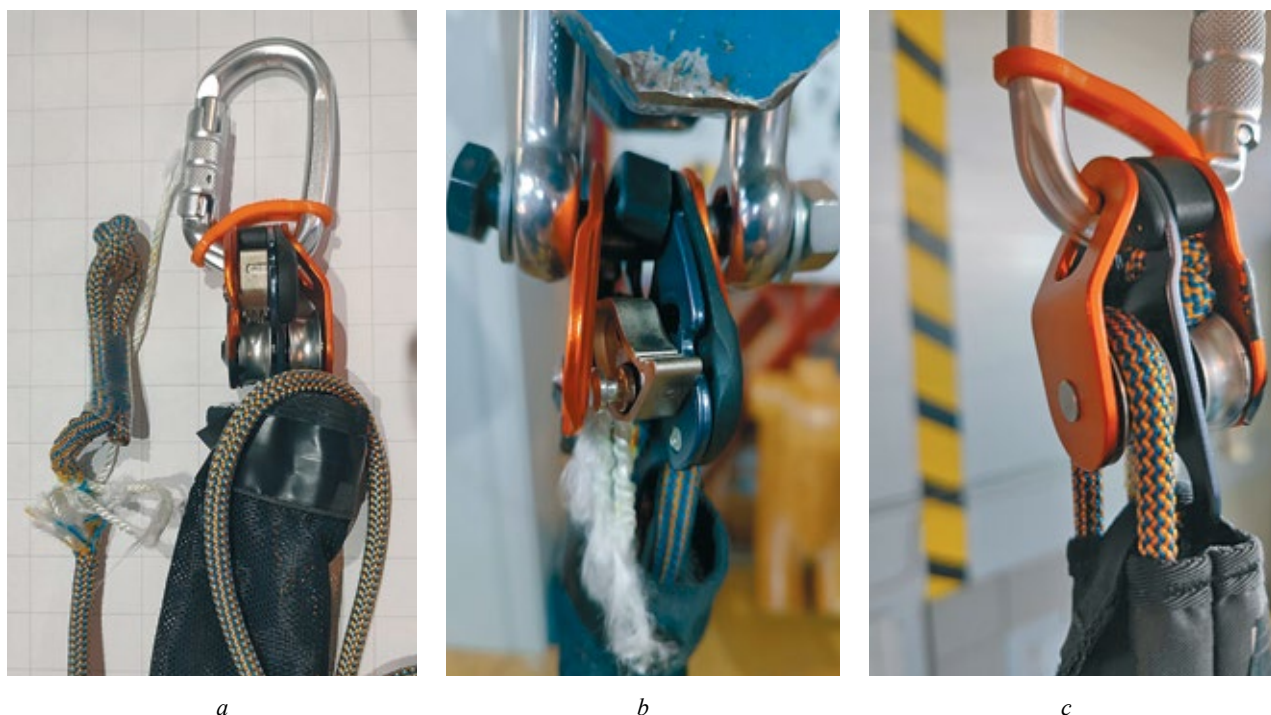


Рис. 14. Возможные сценарии разрушения полиспаста
Fig. 14. Possible scenarios of the block pulley failure

Устройство должно удерживать груз. Снятие оплетки недопустимо. Общая длина полиспаста после удержания груза не должна превышать 1500⁺⁵⁰ мм. Функционирование спуска и подъема после испытания не нарушены.

Внести в Методику испытаний следующие пункты:

- устройство присоединяют в выбранной позиции к анкерной точке испытательного оборудования;
- если спасательное устройство предназначено для совместного использования с триподом или подобным анкерным устройством, проверяют весь комплекс;
- спасательное устройство необходимо отрегулировать таким образом, чтобы общая длина между соединительными элементами была 1000 мм. Зажим необходимо установить в рабочее положение, когда он фиксирует рабочий канат устройства в соответствии с эксплуатационной документацией;
- испытательный груз опускают до полного натяжения устройства и далее поднимают на 600 мм, и располагают его на расстоянии не более 300 мм по горизонтали от центральной оси спасательного устройства. Груз удерживают с помощью устройства быстрого расцепления. Далее устройство быстрого расцепления приводят в действие. Фиксируют удержание груза и общую длину спасательного устройства. Функция спуска или подъема не должны быть нарушены.

2. Статическая прочность для устройств класса С

Требование: при испытании нагрузкой, эквивалентной 5-кратной максимальной номинальной нагрузке, но не менее 12 кН, спасательное устройство с заблокированным зажимом должно выдерживать приложенную нагрузку не менее 3 мин без образования трещин или снятия оплетки на канате.

При испытании нагрузкой, эквивалентной 2-кратной максимальной номинальной нагрузке, но не менее 6 кН, спасательное устройство с разблокированным зажимом должно выдерживать приложенную нагрузку не менее 3 мин без прохождения свободного конца через подвижный блок устройства.

Внести в Методику испытаний следующие пункты:

- образец для испытания. Изготовитель должен предоставить образец с длиной изделия, не более 2 м, а концевая заделка должна быть аналогична представленной в устройстве, реализуемом потребителю;
- **при первом испытании:** если спасательное устройство предназначено для совместного использования с триподом или подобным анкерным устройством, то проверяют весь комплекс;

- при первом испытании присоединяют спасательное устройство к испытательному стенду с помощью точки крепления этого устройства с одной стороны и концевого соединения стропа с точкой крепления на другой стороне;
- спасательное устройство необходимо отрегулировать таким образом, чтобы общая длина между соединительными элементами была 1000 мм. Зажим необходимо установить в рабочее положение, когда он фиксирует рабочий канат устройства в соответствии с эксплуатационной документацией. Далее прикладывают силу, эквивалентную 5-кратной максимальной номинальной нагрузке с предельным отклонением плюс 0,2 кН, но не менее 12 кН, и поддерживают такую силу в течение 3 мин. Проверяют, удерживает ли испытуемый образец приложенное усилие без появления трещин, осматривают канат на наличие снятия оплетки;
- **при втором испытании** присоединяют спасательное устройство к испытательному стенду с помощью точки крепления этого устройства с одной стороны и концевого соединения стропа с точкой крепления на другой стороне;
- спасательное устройство необходимо отрегулировать на полную длину так, чтобы свободный конец устройства упирался в зажимное устройство или подвижный блок. Зажим необходимо разблокировать в соответствии с эксплуатационной документацией. Если зажим выполнен в виде схватывающего узла, необходимо его разблокировать и зафиксировать, чтобы он не приводился в действие при испытании. Разрешено удаление зажима, если он мешает проведению испытания. Далее прикладывают силу, эквивалентную 2-кратной максимальной номинальной нагрузке с предельным отклонением плюс 0,2 кН, но не менее 6 кН, и поддерживают такую силу в течение 3 мин. Проверяют, удерживает ли испытуемый образец приложенное усилие без прохождения свободного конца устройства (концевой заделки устройства) через подвижный блок;
- для каждого испытания может быть использован новый испытуемый образец.

3. Функциональная проверка усилия, прилагаемого пользователем для подъема груза

Требование: усилие, передаваемое на тянущий конец полиспаста, не должно превышать 250 Н при использовании 1 пользователем и 500 Н при использовании 2 и более пользователей.

Внести в Методику испытаний следующие пункты:

- устройство прикрепляют свободным концом к анкерному устройству. На второй конец прикрепляют

пляют испытательную массу, соответствующую максимальной рабочей нагрузке устройства;

- при помощи сборных грузов в 1 кг прикладывают постепенно нагрузку до начала срабатывания полиспаста или достижения нагрузки в 250Н или 500Н, далее фиксируют результат. При достижении необходимой нагрузки свободный конец полиспаста должен вытянуться минимально на 300 мм. Возможно приложение нагрузки другими способами с коэффициентом отклонения по нагрузке в ± 1 кг.

Выводы

Коллективом авторов была рассмотрена актуальная проблема сертификации одного из устройств, которое применяется в комплектах спасения и эвакуации пострадавшего, находящегося в безопасном или частично опорном пространстве после удержания страховочной системой, системой позиционирования или удержания.

Необходимо провести профессиональное обсуждение о вынесении полиспастов в отдельный класс устройств, относящихся к ГОСТ EN 1496–2020 без предъявления требований к максимальной силе торможения в связи с ограничением применения устройства в системах удержания пользования при падении. Таким образом, требуется мнение всех сторон (изготовителей, потребителей, органов по сертификации, испытательных лабораторий и др.). Данное изменение упростит процедуру сертификации, сделает ее более объективной, приближенной к реальным условиям использования.

Введение в отдельный класс устройств полиспасты приведет к прозрачности процедуры идентификации изделия, повысит безопасность при использовании и определит область применения полиспастов.

Дальнейшие исследования должны быть направлены на решение вопросов динамической прочности при разблокированном зажиме каната и введение критерия проверки концевой заделки после динамических испытаний.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Боровлев С.А., Овчаренко М.С. Анализ существующих систем и способов обеспечения безопасности во время проведения строительно-монтажных работ на высоте // Молодые лидеры — 2017 : мат. VII Междунар. заочн. конкурса науч.-исслед. работ (г. Казань, 16 октября 2017 г.). Казань : «Ракета Союз», 2017. С. 370–375. URL: <https://elibrary.ru/item.asp?id=32394538>
2. Varianou-Mikellidou C., Boustras G., Nicolaidou O., Dimopoulos C., Anyfantis I., Messios P. Work-related factors and individual characteristics affecting work ability of different age groups // Safety Science. 2020. Vol. 128. P. 104755. DOI: 10.1016/j.ssci.2020.104755
3. Субботина Н.А. Снижение травматизма на строительной площадке на основе совершенствования модели безопасного поведения работников, выполняющих работы на высоте // XXI век: итоги прошлого и проблемы настоящего плюс. 2023. Т. 12. № 3 (63). С. 160–166. URL: <https://elibrary.ru/item.asp?id=54514058>
4. Брацук А.А., Янишина Э.Р., Иванова Л.А. Средства индивидуальной защиты, повышающие безопасность работ на высоте // Научный журнал. 2016. № 12 (13). С. 36–38. URL: <https://elibrary.ru/item.asp?id=27538699>
5. Кузьмин П.А., Латышева Д.С. Средства индивидуальной защиты как эффективное средство минимизации рисков и травматизма работников // Вестник науки. 2020. Т. 1. № 7 (28). С. 141–148. URL: <https://elibrary.ru/item.asp?id=43066997>
6. Ступаков А.А., Леликов Г.Д. Расчет рисков от использования средств индивидуальной защиты от падения с высоты // Механизация строительства. 2014. № 12 (846). С. 50–54. URL: <https://elibrary.ru/item.asp?id=22828009>
7. Baszczyński K. Effects of safety harnesses protecting against falls from a height on the user's body in suspension // International Journal of Environmental Research and Public Health (IJERPH). 2023. No. 20. P. 71. DOI: 10.3390/ijerph20010071
8. Weber S.A., McGahan M.M., Kaufmann C., Biswas S. Suspension trauma: a clinical review // Cureus. 2020. No. 12 (6). P. e8514. DOI: 10.7759/cureus.8514
9. Drew R. Le traumatisme de suspension — un tueur silencieux // Canadian Journal of Emergency Nursing. 2020. Т. 43. № 3. С. 10–12.
10. Кокишарова С.М., Власова Л.П. Анализ современных систем безопасности при работе на высоте // Общество. Наука. Образование. 2023. С. 80–90. DOI: 10.55648/978-5-91434-082-4-2023-80-90 URL: <https://elibrary.ru/item.asp?id=53957098>
11. Коноваленко В.Н., Коноваленко А.А., Орешкин М.В. Проведение аварийно-спасательных работ на объектах повышенной высотности // Социально-экономические и технические системы: исследование, проектирование, оптимизация. 2021. № 2 (88). С. 277–291. URL: <https://elibrary.ru/item.asp?id=46379836>

12. Pham N.T., Vasilenko V., Korolchenko D.A. Test and certification procedures of pulleys as a part of personal fall arrest system // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. Moscow, 2018. Vol. 365. P. 042057. DOI: 10.1088/1757-899X/365/4/042057
13. Хабрат Н.И. КПД подвижных и неподвижных блоков полиспаста // Тракторы и сельскохозяйственные машины. 2006. № 2. С. 31–32.
14. Baszczyński K., Jachowicz M. Corrosion of retractable type fall arresters // International Journal of Occupational Safety and Ergonomics. 2009. Т. 15. № 3. Рр. 265–275. DOI: 10.1080/10803548.2009.11076807
15. Киселева А.И., Бельшиева В.С. Сертификация продукции. Особенности применения схем сертификации // Инновационные технологии нового тысячелетия : сб. ст. Междунар. науч.-практ. конф. в 2 ч. (г. Уфа, 1 июля 2017 г.). Часть 2. Уфа : Аэтерна, 2017. С. 61–63.
16. Guirrette-Barbosa O.-A., Durán-Muñoz H.-A., Cruz-Domínguez O., Carrera-Escobedo J.-L., Celaya-Padilla J.-M., Castañeda-Burciaga S. Management system according to ISO/IEC 17025: method validation // Applied Sciences. 2024. Vol. 14. Issue 10. P. 4114. DOI: 10.3390/app14104114
17. Антонова В.А., Шушунова Н.С., Леликов Г.Д. Корректировка метода проведения динамических испытаний средств индивидуальной защиты втягивающего типа // e-FORUM. 2021. Т. 5. № 2. URL: <https://usue-journal.ru/images/pdf/15/12.pdf>
18. Леликов Г.Д., Жердев К.В., Антонова В.А. Результаты экспериментальных исследований динамического испытания анкерной линии на кровельном покрытии // Инженерно-строительный вестник Прикаспия. 2022. № 3 (41). С. 10–15. DOI: 10.52684/2312-3702-2022-413-10-15
19. Василенко В.В. Актуализация методики динамических испытаний амортизаторов как средств индивидуальной защиты от падения с высоты // Строительство — формирование среды жизнедеятельности. : сб. тр. XX Междунар. межвуз. науч.-практ. конф. студентов, магистрантов, аспирантов и молодых ученых (г. Москва, 26–28 апреля 2017 г.). М. : НИУ МГСУ, 2017. С. 439–441.
20. Leuthäusser U. Physics of climbing ropes: impact forces, fall factors and rope drag. 2012.
21. Леликов Г.Д., Василенко В.В. Анализ применения страховочных стропов из синтетических канатов как СИЗ от падения с высоты // Строительство — формирование среды жизнедеятельности : сб. тр. XX Междунар. межвуз. науч.-практ. конф. студентов, магистрантов, аспирантов и молодых ученых (г. Москва, 26–28 апреля 2017 г.). М. : НИУ МГСУ, 2017. С. 475–477.
22. Hemmatpour M., Ferrero R., Montrucchio B., Rebaudengo M. A review on fall prediction and prevention system for personal devices: evaluation and experimental results // Advances in Human-Computer Interaction. 2019. Vol. 2019. Pp. 1–12. DOI: 10.1155/2019/9610567

REFERENCES

1. Borovlev S.A., Ovcharenko M.S. Analysis of existing systems and methods of ensuring safety during construction and installation work at height. *Young Leaders — 2017 : mat. VII International. by correspondence. scientific research competition. work, Kazakhstan, October 16, 2017*. Kazan, Róketa Soyuz Publ., 2017; 370-375. URL: <https://elibrary.ru/item.asp?id=32394538> (rus).
2. Varianou-Mikellidou C., Boustras G., Nicolaidou O., Dimopoulos C., Anyfantis I., Messios P. Work-related factors and individual characteristics affecting work ability of different age groups. *Safety Science*. 2020; 128:104755. DOI: 10.1016/j.ssci.2020.104755
3. Subbotina N.A. Reducing injuries at the construction site on the basis of improving the model of safe behavior of workers performing work at height. *XXI Century: Resumes of the Past and Challenges of the Present Plus*. 2023; 12(3):160-166. URL: <https://elibrary.ru/item.asp?id=54514058> (rus).
4. Bratsuk A.A., Yanshina E.R., Ivanova L.A. Personal protective equipment that increases the safety of work at height. *Scientific Journal*. 2016; 12(13):36-38. URL: <https://elibrary.ru/item.asp?id=27538699> (rus).
5. Kuzmin P.A., Latysheva D.S. Personal protective equipment as an effective means of minimizing risks and injuries of workers. *Bulletin of Science*. 2020; 1(7):141-148. URL: <https://elibrary.ru/item.asp?id=43066997> (rus).
6. Stupakov A.A., Lelikov G.D. Calculation of risks from the use of personal protective equipment against falls from height. *Mechanization of Construction*. 2014; 12(846):50-54. URL: <https://elibrary.ru/item.asp?id=22828009> (rus).
7. Baszczyński K. Effects of safety harnesses protecting against falls from a height on the user's body in suspension. *International Journal of Environmental Research and Public Health (IJERPH)*. 2023; 20:71. DOI: 10.3390/ijerp20010071
8. Weber S.A., Mcgahan M.M., Kaufmann C., Biswas S. Suspension trauma: a clinical review. *Cureus*. 2020; 12(6):e8514. DOI: 10.7759/cureus.8514

9. Drew R. Le traumatisme de suspension — un tueur silencieux. *Canadian Journal of Emergency Nursing*. 2020; 43(3):10-12.
10. Koksharova S.M., Vlasova L.P. Analysis of modern safety systems when working at height. *Society-Science-Education*. 2023; 80-90. DOI: 10.55648/978-5-91434-082-4-2023-80-90 URL: <https://elibrary.ru/item.asp?id=53957098> (rus).
11. Konovalenko V.N., Konovalenko A.A., Oreshkin M.V. Conducting emergency rescue operations at high-altitude facilities. *Social-Economic and Technical Systems: Research, Design and Optimization*. 2021; 2(88):277-291. URL: <https://elibrary.ru/item.asp?id=46379836> (rus).
12. Pham N.T., Vasilenko V., Korolchenko D.A. Test and certification procedures of pulleys as a part of personal fall arrest system. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*. Moscow, 2018; 365:042057. DOI: 10.1088/1757-899X/365/4/042057
13. Khabrat N.I. EFFICIENCY of movable and fixed blocks of polispast. *Tractors and agricultural machines*. 2006; 2:31-32. (rus).
14. Baszczyński K., Jachowicz M. Corrosion of retractable type fall arresters. *International Journal of Occupational Safety and Ergonomics*. 2009; 15(3):265-275. DOI: 10.1080/10803548.2009.11076807
15. Kiseleva A.I., Belysheva V.S. Product certification. Features of the application of certification schemes. *Innovative technologies of the new millennium : collection of articles of the International Scientific and Practical Conference at 2 o'clock (Ufa, July 1, 2017). Part 2*. Ufa, Aeterna Publ., 2017; 61-63. (rus).
16. Guirette-Barbosa O.-A., Durán-Muñoz H.-A., Cruz-Domínguez O., Carrera-Escobedo J.-L., Celaya-Padilla J.-M., Castañeda-Burciaga S. Management system according to ISO/IEC 17025: method validation. *Applied Sciences*. 2024; 14(10):4114. DOI: 10.3390/app14104114
17. Antonova V.A., Shushunova N.S., Lelikov G.D. Correction of the method when conducting dynamic tests of personal protective equipment of the retractable type. *e-FORUM*. 2021; 5(2). URL: <https://usue-journal.ru/images/pdf/15/12.pdf> (rus).
18. Lelikov G.D., Zherdev K.V., Antonova V.A. Results of experimental studies of dynamic test of anchor line on roofing. *Engineering and Construction Bulletin of the Caspian Region*. 2022; 3(41):10-15. DOI: 10.52684/2312-3702-2022-413-10-15 (rus).
19. Vasilenko V.V. Updating the methodology of dynamic testing of shock absorbers as personal protective equipment against falling from a height. *State — modeling of the habitat : S.T. R. of the XX century. inter-university. scientific and practical conference of students, undergraduates, postgraduates and young scientists (Moscow, April 26-28, 2017). Moscow, MGSU, 2017; 439-441. (rus).*
20. Leuthäusser U. *Physics of climbing ropes: impact forces, fall factors and rope drag*. 2012.
21. Lelikov G.D., Vasilenko V.V. Analysis of the application of intellectual methods as a result of interaction with visitors. *State — modeling of the habitat : S.T. R. of the XX century. inter-university. scientific and practical conference of students, undergraduates, postgraduates and young scientists (Moscow, April 26-28, 2017). Moscow, MGSU, 2017; 475-477. (rus).*
22. Hemmatpour M., Ferrero R., Montrucchio B., Rebaudengo M. A review on fall prediction and prevention system for personal devices: evaluation and experimental results. *Advances in Human-Computer Interaction*. 2019; 2019:1-12. DOI: 10.1155/2019/9610567

Поступила 02.04.2024, после доработки 22.04.2024;

принята к публикации 15.05.2024

Received April 2, 2024; Received in revised form April 22, 2024;

Accepted May 15, 2024

Информация об авторах

КОРОЛЬЧЕНКО Дмитрий Александрович, д-р техн. наук, доцент, заведующий кафедрой комплексной безопасности в строительстве, Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет, Россия, 129337, г. Москва, Ярославское шоссе, 26; РИНЦ ID: 352067; Scopus AuthorID: 55946060600; ResearcherID: E-1862-2017; ORCID: 0000-0002-2361-6428; e-mail: ikbs@mgsu.ru

Information about the authors

Dmitriy A. KOROLCHENKO, Dr. Sci. (Eng.), Docent, Head of Department of Integrated Safety in Civil Engineering, Moscow State University of Civil Engineering (National Research University), Yaroslavskoe shosse, 26, Moscow, 129337, Russian Federation; ID RISC: 352067; Scopus AuthorID: 55946060600; ResearcherID: E-1862-2017; ORCID: 0000-0002-2361-6428; e-mail: ikbs@mgsu.ru

ТЕРЕХ Надежда Александровна, лаборант испытательной лаборатории института комплексной безопасности в строительстве, Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет, Россия, 129337, г. Москва, Ярославское шоссе, 26; ORCID: 0009-0005-9723-9644; e-mail: nadezhdakashinova@yandex.ru

ПРОСТАКИШИН Дмитрий Александрович, инженер испытательной лаборатории Института комплексной безопасности в строительстве, Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет, Россия, 129337, г. Москва, Ярославское шоссе, 26; AuthorID: 1092806; ORCID: 0009-0008-5350-6976; e-mail: d.prostakishin@ikbs-mgsu.ru

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

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Nadezhda A. TSERAKH, Laboratory Technician of Testing Laboratory of Institute of Complex Safety in Construction, Moscow State University of Civil Engineering (National Research University), Yaroslavskoe shosse, 26, Moscow, 129337, Russian Federation; ORCID: 0009-0005-9723-9644; e-mail: nadezhdakashinova@yandex.ru

Dmitriy A. PROSTAKISHIN, Engineer of Testing Laboratory of Institute of Complex Safety in Construction, Moscow State University of Civil Engineering (National Research University), Yaroslavskoe shosse, 26, Moscow, 129337, Russian Federation; AuthorID: 1092806; ORCID: 0009-0008-5350-6976; e-mail: d.prostakishin@ikbs-mgsu.ru

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

The authors declare that there is no conflict of interest.

Обоснование по выбору экспертного метода для проведения оценки состояния системы комплексной безопасности на производственных предприятиях

Евгений Владимирович Гвоздев ✉

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

АННОТАЦИЯ

Введение. В статье представлена система комплексной безопасности (СКБ), для которой получена количественная мера влияния подсистем промышленной и пожарной безопасности (ПрБ и ПБ), охраны труда (ОТ), производственных структурных подразделений (ПСП).

Цели и задачи. Цель настоящей статьи состоит в повышении состояния СКБ на предприятии за счет оценки влияния на нее персонала (ПрБ; ПБ; ОТ; ПСП), который выполняет должностные обязанности по обеспечению качественного функционирования рассматриваемой системы; для этого потребовалось решить две задачи.

Результаты решения задач. В ходе решения задачи № 1 представлено обоснование о предпочтительности использования метода расстановки приоритетов, который совместно с функционалом нормального распределения Гаусса позволяет решать задачи по выбору экспертами конкретной подсистемы (ПрБ; ПБ; ОТ; ПСП), в которой имеются недоработки. В ходе решения задачи № 2 представлен пример, обосновывающий адекватность совместного применения рассматриваемого метода на практике.

Выводы. На основе системного анализа методов, используемых на практике, представлено обоснование по применению такого экспертного метода, с помощью которого получены количественные значения, отображаемые в виде коэффициента влияния, что указывает на определенные отклонения и позволяет откорректировать модель управления персоналом (ПрБ; ПБ; ОТ; ПСП).

Продemonстрирован пример, позволяющий доказать адекватность использования метода оценки состояния СКБ, созданной на производственном предприятии.

Применение разработанной модели развития СКБ на производственных предприятиях России позволяет на практике решать проблему по снижению ущерба от аварий и пожаров в рассматриваемой системе, т.е. решать проблему, имеющую важное социально-экономическое значение для России.

Ключевые слова: метод расстановки приоритетов; нормальное распределение Гаусса; коэффициент влияния; охрана труда; производственные структурные подразделения; экспертное решение

Для цитирования: Гвоздев Е.В. Обоснование по выбору экспертного метода для проведения оценки состояния системы комплексной безопасности на производственных предприятиях // Пожаровзрывобезопасность/Fire and Explosion Safety. 2024. Т. 33. № 3. С. 87–96. DOI: 10.22227/0869-7493.2024.33.03.87-96

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

Justification for the choice of an expert method for assessing the state of the integrated safety system at industrial enterprises

Evgeniy V. Gvozdev ✉

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

ABSTRACT

Introduction. The paper presents an integrated security system (ISS), for which a quantitative measure of the influence of subsystems of industrial and fire safety (IS and FS), labour protection (LP), production structural units (PSU) is obtained.

Goals and objectives. The purpose of the presented paper is to improve the state of the ISS at the enterprise by assessing the influence of personnel (IS and FS; LP; PSU) on it, which performs labour functions to ensure the quality functioning of the system under consideration, it was necessary to solve two problems.

Results. In the course of solving problem No. 1, the substantiation of the preferability of using the method of prioritisation is presented, which together with the Gaussian normal distribution functional, allows solving problems of experts choosing a specific subsystem (IS and FS; LP; PSU) in which there are drawbacks. In the course of solving

problem No. 2, an example substantiating the adequacy of the joint application of the considered method in practice is presented.

Conclusions. On the basis of the system analysis of the methods used in practice, the justification for the use of such an expert method is presented, with the help of which quantitative values are displayed in the form of the influence coefficient, which indicates certain deviations and allows to correct the personnel management model (IS and FS; LP; PSU).

An example is demonstrated that allows us to prove the adequacy of using the method of assessing the state of the ISS created at a manufacturing enterprise.

The application of the developed model for the development of the ISS at Russian manufacturing enterprises makes it possible in practice to solve the problem of reducing damage from accidents and fires in the system under consideration, i.e. to solve the problem of important socio-economic importance for Russia.

Keywords: prioritization method; normal Gaussian distribution; coefficient of influence; labour protection; production structural units; expert decision

For citation: Gvozdev E.V. Justification for the choice of an expert method for assessing the state of the integrated safety system at industrial enterprises. *Pozharovzryvobezopasnost/Fire and Explosion Safety*. 2024; 33(3):87-96. DOI: 10.22227/0869-7493.2024.33.03.87-96 (rus).

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

Введение

Анализ статистики аварий и пожаров на взрывопожароопасных производственных предприятиях (далее — ВПО предприятия) свидетельствует о том, что ежегодно на таких предприятиях происходит совместных опасных событий (аварий и пожаров) около 20 % от общего числа аварий, ущерб от которых составляет около 46 % от общего ущерба от аварий, такие события приводят к санитарным и безвозвратным потерям персонала и третьих лиц [1–3]. При возникновении аварий и пожаров, как правило, наносится существенный экономический ущерб, исчисляемый десятками миллионов рублей, а в случае временной потери устойчивого функционирования производственных предприятий, участвующих в процессе обеспечения жизнедеятельности населения, проживающего в городах, например, предприятие ПАО «Мосводоканал»; ПАО «Мосэнерго»; ПАО «МОЭК» и т.д., создаются неблагоприятные условия, представляющие угрозу для жизнеобеспечения населения.

Для предупреждения (предотвращения) аварий и пожаров на ВПО предприятиях в основном стало традицией создавать систему комплексной безопасности (далее — СКБ), в штатную структуру которой входит орган управления, а также состав специалистов и рабочих, обеспечивающих качественное функционирование ведомственных (отраслевых) подсистем промышленной безопасности (далее — ПрБ), пожарной безопасности (далее — ПБ), охраны труда (далее — ОТ). В рассматриваемую систему также входит персонал от структурных подразделений предприятия (далее — ПСП), который участвует в обеспечении качественного функционирования СКБ, сформированной на производственном предприятии [4–6].

На основе анализа используемых на практике способов реализации мероприятий в организационном направлении выявлены существенные недо-

статки при функционировании созданной на производственных предприятиях СКБ. В поле зрения всегда присутствует факт с утверждением, что в настоящий момент деятельность по управлению СКБ, созданной на производственных предприятиях, недостаточно структурирована, регламентирована, формализована, это выражается в наличии причинных обстоятельств:

- многие факторы, параметры, связи выявляются в процессе проведения расследования для возникших новых опасных событий (аварий и пожаров);
- возникающие отклонения, выявленные в процессе проведения профилактически-предупредительных мероприятий по минимизации (исключению) рисков возникновения опасных событий (аварий и пожаров), как правило, не обозначены в количественном (числовом) значении, в выводах представляют собой общее описание.

Потребовалось обосновать использование нового метода для проведения оценки воздействия персонала (ПрБ; ПБ; ОТ; ПСП), который выполняет трудовые функции по обеспечению качественного функционирования рассматриваемой системы.

Цель и задачи исследования

Цель настоящей статьи состоит в повышении состояния СКБ на предприятии за счет оценки влияния на нее персонала (ПрБ; ПБ; ОТ; ПСП), который выполняет трудовые функции по обеспечению качественного функционирования рассматриваемой системы.

Для достижения сформулированной цели потребовалось решить следующие задачи:

1. На основе системного анализа методов, используемых на практике, представить обоснование по применению такого метода, который позволит получить количественные значения в виде отклоне-

ний, откорректировать модель управления персоналом (ПрБ; ПБ; ОТ; ПСП).

2. Продемонстрировать пример, позволяющий доказать адекватность использования метода оценки состояния СКБ, созданной на производственном предприятии.

Решение задачи № 1

Для принятия решений по отношению к поставленной задаче потребовалось сосредоточить внимание на имеющихся наработках в области эффективного управления СКБ, что позволяет в дальнейшем качественно принимать решения для органа ее управления. Имеющаяся на настоящий момент проблема для рассматриваемой области исследования усложнена многовариантностью для принятия решения органа управления СКБ по причине наличия большого числа вариантов для перспективных действий, где утверждение каждого конкретного решения для его использования на практике позволит говорить о правильности выбора (наилучшего, оптимального). Чтобы выбор был предпочтительным, необходимо воспользоваться инструментарием системного анализа и набором методов экспертного оценивания [7–11].

Системный анализ позволяет решить многовариантную сложную задачу по управлению СКБ, т.е. выработать такой вариант для решения данной задачи, который будет в перспективе реализован. Для того чтобы был сформирован проект для

окончательного решения, необходимо сформулировать проблему, исследовать все элементы, которые к ней имеют отношение, определить метод (группу методов), определить последовательность их применения на практике, после чего произвести требуемые построения и расчеты. Элементы, методы (приемы) системного анализа представлены на рис. 1 [12–17].

Данные методы (рис. 1) не претендуют на исчерпывающую полноту всех методов, используемых в системном анализе, так как в методологии системного анализа комплексной безопасности (далее — КБ) ВПО предприятий может быть обосновано использование других методов, позволяющих переводить решение задач на более качественный уровень.

Для получения количественного значения исследуемых факторов, рассматриваемых в условиях неопределенности, когда система управления описывается с точки зрения ее качественного состояния, возникает необходимость прибегать к использованию экспертной оценки в форме высказывания экспертами своих обоснованных утверждений о количественном выражении степени предпочтительности оцениваемого объекта, что позволяет говорить о проведении количественной экспертной оценки (рис. 2).

На рис. 2 представлены направления возможностей при использовании экспертов для оценки состояния КБ на ВПО предприятиях. Порядок проведения мероприятий для оценки состояния СКБ на ВПО предприятиях строится для представления

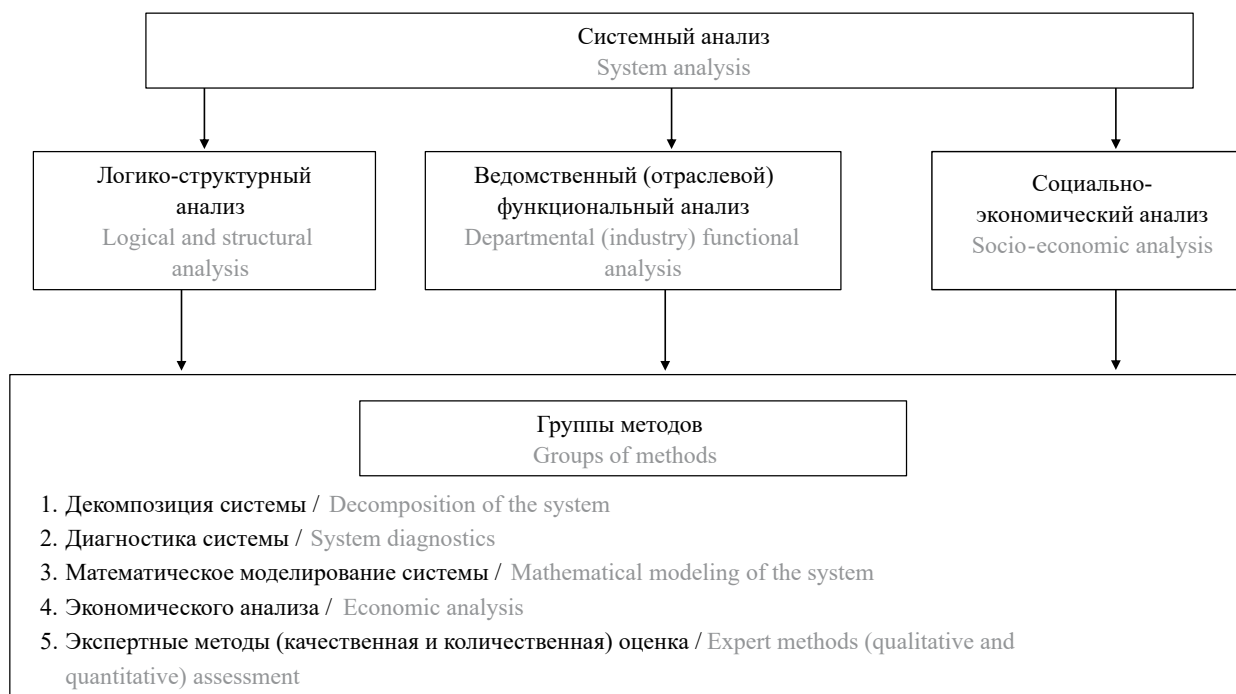


Рис. 1. Основные методы в структуре системного анализа
Fig. 1. The main methods in the structure of system analysis

Возможности в случае привлечения экспертов для оценки состояния СКБ на предприятиях Opportunities in case of involvement of experts to assess the state of SCS in enterprises
Проанализировать сложную систему, описываемую в основном в виде качественного неформализуемого процесса функционирования To analyze a complex system described mainly in the form of a qualitative non-formalized process of functioning
Проранжировать требуемые элементы по заданному критерию наиболее существенных факторов To rank the required elements according to a given criterion of the most significant factors
Повысить надежность количественной оценки целевых функций за счет усреднения мнений экспертов To increase the reliability of the quantitative assessment of target functions by averaging the opinions of experts
Использовать для полученных количественных значений другие методы, позволяющие обосновать допустимость погрешностей Use other methods for the obtained quantitative values to justify the tolerance of errors
Получить количественное задание начальных условий для их оперативной корректировки с использованием других обоснованных методов To obtain a quantitative assignment of the initial conditions for their operational adjustment using other reasonable methods

Рис. 2. Возможности при использовании экспертов для оценки состояния СКБ на предприятиях

Fig. 2. The possibilities of using experts to assess the state of the ISS in enterprises

логического вывода, основанного на имеющемся багаже специальных знаний и личного опыта эксперта. При любой постановке задачи экспертом проводится следующий обязательный набор мероприятий:

- по моделированию объекта измерения с его разложения на составные элементы;
- по выделению факторов, играющих ключевую роль для определения количественной оценки;
- по учету степени влияния факторов на определение конечной количественной оценки [18–20].

В основном, экспертные методы (*Дельфы, анализа иерархий, мозгового штурма, экспертного опроса и др.*) сводятся к решению задач на основе расстановки приоритетов, где одним из видов высказывания мнения эксперта становится парное сравнение оцениваемых объектов с целью выявить предпочтение одного по отношению к другому. Здесь получаемый результат от попарного сравнения оцениваемых объектов наиболее точно отражает субъективное предпочтение, так как эксперту не навязываются априорные условия, а также ему задаются наименьшие ограничения [21].

Математически решение экспертных задач можно описать как результативность оцениваемого объекта по отношению к другому в виде направленного графа (рис. 3).

Каждому из n -объектов ($X_1, X_2, \dots, X_n$) соответствует вершина графа, который выражает результат предпочтения одного оцениваемого объекта по отношению к другому.

Решить такую задачу по определению предпочтительности одного объекта по отношению к группе, состоящей из n -объектов, с использованием рисунка представляет определенные трудности, здесь требуется строить матрицу $A = \|a_{ij}\|$;

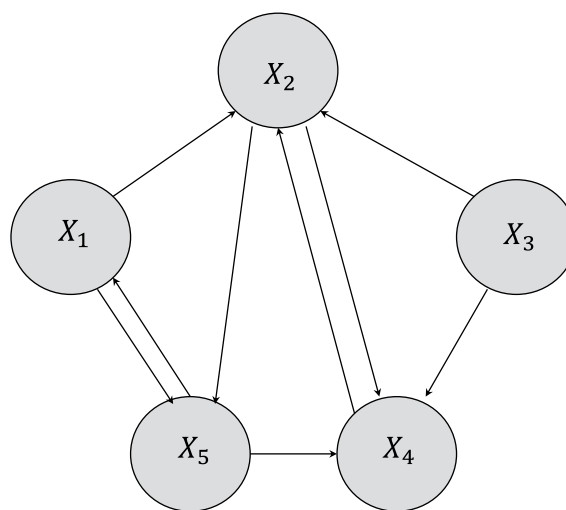


Рис. 3. Граф результата оценки n объектов
Fig. 3. Graph of the n object evaluation result

$$A = \begin{pmatrix} a_{11} & a_{12} & \dots & a_{1j} & \dots & a_{1n} \\ a_{21} & a_{23} & \dots & a_{2j} & \dots & a_{2n} \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ a_{i1} & a_{i2} & \dots & a_{ij} & \dots & a_{in} \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ a_{n1} & a_{n2} & \dots & a_{nj} & \dots & a_{nn} \end{pmatrix}.$$

При этом

$$a_{ij} = \begin{cases} 1, & \text{если } X_i > X_j; \\ 0,5, & \text{если } X_i = X_j; \\ 0, & \text{если } X_i < X_j, \end{cases}$$

где $i = j \rightarrow \{1, 2, \dots, n\}$; $a_{ij} = 0,5$;

$X_i > X_j$ означает приоритет одного оцениваемого объекта по отношению к другому;

$X_i = X_j$ означает равную важность оцениваемых объектов.

В сложной функционирующей СКБ, создаваемой на ВПО предприятиях для проведения оценки ее состояния, в первую очередь рассматриваются данные со статистикой аварий, пожаров, анализ таких данных позволяет:

- с одной стороны, определить причины в виде выявленных отклонений (недоработок подсистем ПрБ; ПБ; ОТ; ПССП) при выполнении персоналом трудовых обязанностей, обозначаемые в виде коэффициента воздействия k , принадлежащего подсистеме X_i ;
- с другой стороны, определить характер нанесенного ущерба от каждой возникшей опасности (аварии и пожара).

Здесь вводится определитель итерированной силы первого порядка, который рассматривается в виде суммы количественных значений, представленных экспертами для оцениваемого объекта № 1, полученный результат для других оцениваемых объектов не учитывается:

$$P_1(1) = \sum_{j=0}^n ij.$$

Распределение количественных значений в виде коэффициента воздействия k , принадлежащего подсистеме X_i , будет задано вектором:

$$P_1(1) = |P_1(1), P_2(1), \dots, P_i(1), \dots, P_n(1)|.$$

Далее с учетом приоритетности воздействия одного оцениваемого объекта над другим проводится расчет итерированной силы второго порядка:

$$P_1(2) = \sum_{j=1}^n a_{ij} P_i(1).$$

В общем виде процесс расчета нормализованной итерированной «силы» оцениваемых объектов можно представить в виде формулы:

$$P^{\text{отн}}(k) = \frac{1}{\lambda(k)} AP^{\text{отн}}(k-1), \quad (1)$$

где $k = 1, 2, \dots$;

$P^{\text{отн}}(k)$ — нормированная итерированная сила k -го порядка i -го оцениваемого объекта;

$\lambda(k) = \sum_{j=1}^n \sum_{i=1}^n a_{ij} P_i^{\text{отн}}(k-1)$ — сумма компонент вектора $AP(k-1)$.

При рассмотрении случая, когда матрица A неразложима, то по теореме Перрона – Фробениуса [10] приводит к получению максимального собственного оценочного значения, представляющего число $\lambda = \lim_{k \rightarrow \infty} \lambda(k)$ матрицы A с собственным вектором:

$$P = \lim_{k \rightarrow \infty} P(k).$$

Для представленного случая процесс вычисления нормированной итерированной «силы» оцениваемых объектов сходится с результатами расчета (1).

Представленное выше обоснование во многом соответствует методу расстановки приоритетов [18], обладающему определенным преимуществом по отношению к другим методам экспертных оценок в связи с тем, что он не имеет предела для расширения границ с целью получения адекватных результатов, представляющих собой количественное значение (меру).

Учитывая то обстоятельство, что созданная на ВПО предприятии СКБ является сложной системой, имеющей множество факторов, оказывающих влияние на ее надежность функционирования, имеющей в структуре обособленные подсистемы (ПрБ; ПБ; ОТ; ПССП), то для качественной оценки состояния каждой из представленных подсистем потребовалось расширить пределы возможностей метода расстановки приоритетов за счет использования совместно с ним функционала нормального распределения Гаусса (правило трех сигм для Гауссовской случайной величины) [22, 23].

Вывод: необходимость в расширении границ экспертного метода расстановки приоритетов заключается в следующем:

1. Метод расстановки приоритетов целесообразен для получения результатов количественных измерений ранжированного ряда со среднеквадратичным отклонением с установленными пределами в одной из подсистем (ПрБ; ПБ; ОТ; ПССП). Для оценки состояния СКБ на ВПО предприятии необходимо учитывать причинно-следственную связь по возникновению и нарастанию условий для возникновения первичных факторов нанесения ущерба от аварий и пожаров.

2. Использование метода расстановки приоритетов совместно с функционалом нормального распределения Гаусса позволит решить следующие задачи:

- по выбору экспертами конкретной подсистемы (ПрБ; ПБ; ОТ; ПССП), отклонения в которой привели к возникновению первичных факторов нанесения ущерба от аварий и пожаров из-за ее недоработок (ошибок);
- по определению конкретного числового значения, представляющего собой результат в виде коэффициента воздействия для каждой подсистемы (ПрБ; ПБ; ОТ; ПССП).

Решение задачи № 2

Эта задача может быть сформулирована следующим образом. Пусть даны подсистемы (ПрБ; ПБ; ОТ; ПССП), для которых при анализе статистики аварий и пожаров на предприятиях нефтегазового комплекса России¹ эксперты определяют конкретную подсистему, которая:

- имеет *непосредственное* отношение к возникновению и нарастанию условий для нанесения ущерба от аварий и пожаров;
- имеет *опосредованное* отношение;
- имеет *косвенное* отношение.

Учитывая, что экспертами будет выдана не числовая и качественная характеристика, то здесь при определении количественного значения для каждого качественного представленного выше значения, то с использованием функционала нормального распределения Гаусса (правило трех сигм для Гауссовской случайной величины) [22], будет принадлежать конкретное значение для каждой из представленных качественных характеристик:

- имеющей *непосредственное* отношение к возникновению и нарастанию условий для нанесения ущерба от аварий и пожаров $\approx 0,682$, этот показатель присваивается конкретной подсистеме (ПрБ; ПБ; ОТ; ПССП);
- имеющей *опосредованное* отношение $\approx 0,272$, этот показатель присваивается конкретной подсистеме (ПрБ; ПБ; ОТ; ПССП), даже той подсистеме, которой при оценке присвоена характеристика как имеющей *непосредственное* отношение;
- имеющей *косвенное* отношение $\approx 0,046$, этот показатель может быть присвоен 1–2 конкретным подсистемам (ПрБ; ПБ; ОТ; ПССП).

Тогда, в общем математическом виде расчетное значение для определения коэффициента воздействия — k_b (ПрБ; ПБ; ОТ; ПССП) может быть записано уравнением:

$$k_b \{ \text{ПрБ; ПБ; ОТ; ПССП} \} = 1 - \sum_{i=1}^3 k_{ni} \{ \text{ПрБ; ПБ; ОТ; ПССП} \}, \quad (2)$$

где k_n — величина, представляющая собой коэффициент недоработок в подсистеме (ПрБ; ПБ; ОТ; ПССП), имеющей (*непосредственное, опосредованное или косвенное*) отношение к возникновению и нарастанию условий для нанесения ущерба от аварий и пожаров.

Общий результирующий показатель работы подсистемы (ПрБ; ПБ; ОТ; ПССП) за период t рассчитывается с привязкой к функционированию видов технологического процесса производства (Д — добыча; Т — транспортировка; П — переработка; Х — хранение; Пр — прочие).

Итоговый результирующий показатель, представляющий собой коэффициент влияния $K_{Вл}$ подсистемы (ПрБ; ПБ; ОТ; ПССП) за период t (год, квартал, месяц и т.д.) с привязкой к функционированию технологического процесса производства, может быть представлен уравнением:

$$K_{Вл} (Д; Т; П; Х; Пр) \{ \text{ПрБ; ПБ; ОТ; ПССП} \} t = \frac{\sum_{i=1}^n k_{bi}}{n}, \quad (3)$$

где n — пронумерованный крайний показатель, принадлежащий выборке.

Информация, рассматриваемая в отношении данных статистики аварий на предприятиях НГК России (для вида технологического процесса производства Д — добыча), обработана с использованием результатов экспертных решений (рис. 4).

На рис. 4 представлены буквенные обозначения, имеющие принадлежность к подсистемам, входящим в СКБ предприятия, они отнесены в следующем порядке: А для ОТ; В для ПрБ; С для ПБ; D для ПССП.

На рис. 5 показана динамика с результатами влияния служб (структурных подразделений предприятия), представляющих подсистемы (ПрБ; ПБ; ОТ; ПССП).

Информация с обработанными результатами экспертных решений указывает на повышение коэффициента влияния $K_{Вл(Д)}$ ПССП (2015–2022 гг.). Одним из факторов, позволивших изменить ситуацию с авариями и пожарами на предприятиях НГК России, стало введение на данных предприятиях дополнительных должностей инженеров пожарной безопасности, которые в обязательном порядке должны осуществлять контроль подготовки и проведения огневых работ. Это позволило уменьшить показатели по возникновению пожаров на предприятиях НГК России, повысить состояние СКБ на данных предприятиях.

¹ Уроки, извлеченные из аварий. URL: <https://www.gosnadzor.ru/industrial/oil/lessons/>

	A			A			A			A	
	0,94			0,93			0,95			0,95	
B		D	B		D	B		D	B		D
0,84	2014	0,31	0,92	2015	0,30	0,83	2016	0,25	0,96	2017	0,22
	C			C			C			C	
	0,90			0,85			0,97			0,86	

	A			A			A	
	0,97			0,99			1,00	
B		D	B		D	B		D
0,91	2018	0,14	0,90	2019	0,16	0,94	2020	0,06
	C			C			C	
	0,98			0,95			1,00	

	A			A	
	1,00			1,00	
B		D	B		D
0,91	2021	0,09	0,93	2022	0,07
	C			C	
	1,00			1,00	

Рис. 4. Результаты обработки информации с решением экспертов

Fig. 4. Results of information processing with the decision of experts

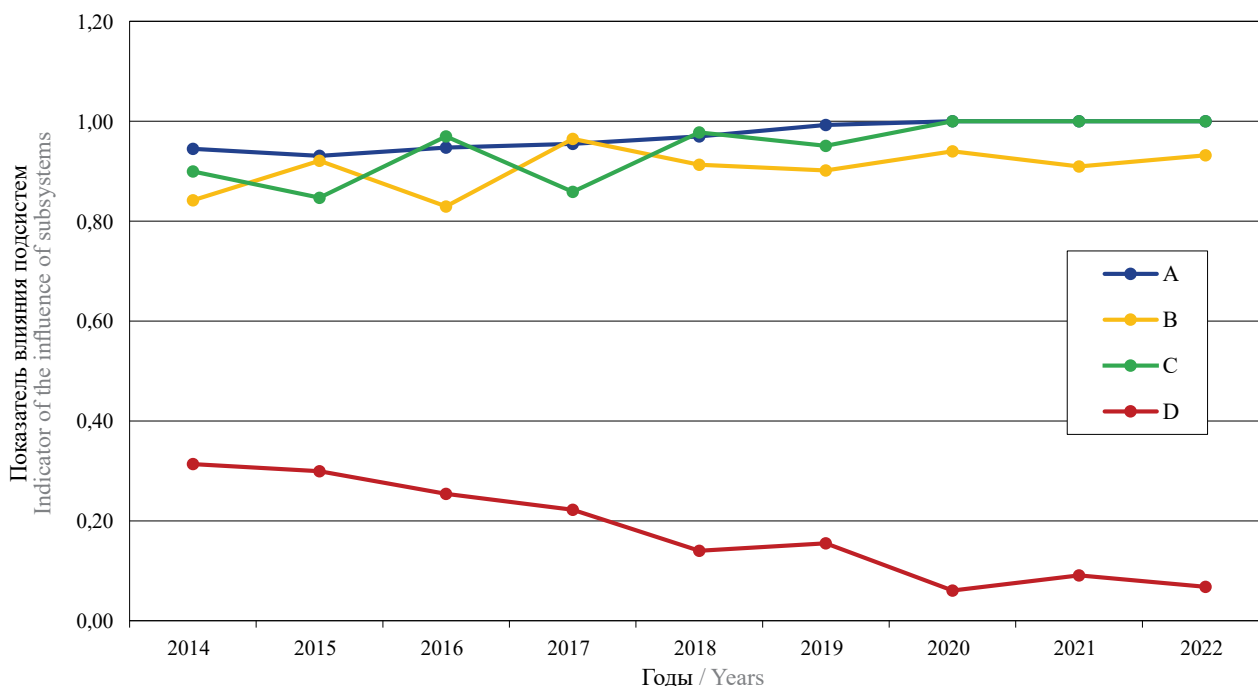


Рис. 5. Результаты анализа влияния подсистем на состояние СКБ предприятий

Fig. 5. The results of the analysis of the influence of subsystems on the state of the enterprises

Представленные результаты (рис. 5) за период в 8 лет указывают на динамичное повышение состояния СКБ предприятий НГК России со стороны ПСПП, здесь было уделено особое внимание мероприятиям, связанным с контролем выполнения договорных обязательств со стороны подрядных организаций. Это позволило сократить на 12 % возникновение аварий и пожаров за период (2020–2022 гг.) по отношению к аналогичному периоду (2017–2019 гг.).

Выводы

В ходе анализа решены поставленные задачи, позволившие выбрать экспертный метод для проведения оценки состояния СКБ на производственных предприятиях, а именно:

1. На основе системного анализа методов, используемых на практике, представлено обоснование по применению такого экспертного метода, с помощью которого получены количественные значения,

отображаемые в виде коэффициента влияния, что указывает на определенные отклонения и позволяет откорректировать модель управления персоналом (ПрБ; ПБ; ОТ; ПСП).

2. Продемонстрирован пример, позволяющий доказать адекватность использования метода оценки состояния СКБ, созданной на производственном предприятии.

Решение задач, направленных на повышение состояния СКБ на производственных предприятиях, позволяет развивать рассматриваемую систему, решать проблему по снижению ущерба от аварий и пожаров на производственных предприятиях, т.е. решать задачу, имеющую важное социально-экономическое значение для России.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Махутов Н.А., Пермяков В.Н., Ахметханов Р.С. и др. Анализ рисков и обеспечение защищенности критически важных объектов нефтегазохимического комплекса : уч. пос. Тюмень : ТюмГНГУ, 2013. 560 с.
2. Gvozdev E.V. Setting a problem on the rational allocation of a resource, intended to ensure integrated enterprise security // Real Estate: Economics, Management. 2023. No. 2. Pp. 50–55. DOI: 10.22337/2073-8412-2023-2-50-55
3. 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
4. Гвоздев Е.В. Развитие методологии управления риском на взрывопожароопасных объектах предприятий // Безопасность труда в промышленности. 2023. № 8. С. 61–69. DOI: 10.24000/0409-2961-2023-8-61-69
5. Гвоздев Е.В. Постановка и решение задачи по развитию системы комплексной безопасности на взрывопожароопасных производственных объектах предприятий // Безопасность труда в промышленности. 2023. № 10. С. 45–53. DOI: 10.24000/0409-2961-2023-10-45-53
6. Gvozdev E.V. Management of complex security of enterprises using the symbolic method // Real Estate: Economics, Management. 2023. No. 4. Pp. 48–53. DOI: 10.22337/2073-8412-2023-4-48-53
7. Ghosh S., Zaboli A., Hong J., Kwon J. An integrated approach of threat analysis for autonomous vehicles perception system // IEEE Access, 11. 2023. No. 99. Pp. 1–1. DOI: 10.1109/ACCESS.2023.3243906
8. Angermeier D., Wester H., Beilke K., Hansch G., Eichler J. Security risk assessments: modeling and risk level propagation // ACM Transactions on Cyber-Physical Systems. 2023. No. 7 (1). DOI: 10.1145/3569458
9. Stroykov G.A., Babyr N.V., Ilin I.V., Marchenko R.S. System of comprehensive assessment of project risks in energy industry // International Journal of Engineering, Transactions A: Basics. 2021. No. 34 (7). DOI: 10.5829/IJE.2021.34.07A.22
10. Srikrishnan V., Lafferty D.C., Wong T.E., Lamontagne J.R., Quinn J.D., Sharma S. et al. Uncertainty analysis in multi-sector systems: Considerations for risk analysis, projection, and planning for complex Systems // Earth's Future. 2022. Vol. 10. Issue 8. DOI: 10.1029/2021EF002644
11. Niazi M.A. Introduction to the modeling and analysis of complex systems : a review // Complex Adaptive Systems Modeling. 2016. No. 4 (1). DOI: 10.1186/s40294-016-0015-x
12. Bjerga T., Aven T., Zio E. Uncertainty treatment in risk analysis of complex systems: The cases of STAMP and FRAM // Reliability Engineering and System Safety. 2016. No. 156. DOI: 10.1016/j.ress.2016.08.004
13. Mbuli N., Mathonsi M., Seitshiro M., Pretorius J.H.C. Decomposition forecasting methods : a review of applications in power systems // Energy Reports. 2020. No. 6. DOI: 10.1016/j.egy.2020.11.238
14. Kim W., Katipamula S. A review of fault detection and diagnostics methods for building systems // Science and Technology for the Built Environment. 2018. No. 24 (1). DOI: 10.1080/23744731.2017.1318008
15. Witelski T., Bowen M. Methods of mathematical modelling: Continuous systems and differential equations // Methods of Mathematical Modelling: Continuous Systems and Differential Equations. 2015. DOI: 10.1007/978-3-319-23042-9
16. Judd K.L. Chapter 12. Approximation, perturbation, and projection methods in economic analysis // Handbook of Computational Economics. 1996. Vol. 1. DOI: 10.1016/S1574-0021(96)01014-3
17. Han Z.Y., Weng W.G. Comparison study on qualitative and quantitative risk assessment methods for urban natural gas pipeline network // Journal of Hazardous Materials. 2011. No. 189 (1–2). DOI: 10.1016/j.jhazmat.2011.02.067
18. Блюмберг В.А., Глуценко В.Ф. Какое решение лучше? Метод расстановки приоритетов. Л. : Лениздат, 1982. 160 с.
19. Bapat R.B. A max version of the Perron-Frobenius theorem // Linear Algebra and Its Applications. 1998. Pp. 275–276. DOI: 10.1016/S0024-3795(97)10057-X
20. Ramalho F.D., Silva I.S., Ekel P.Y., Martins C.A.P. da S., Bernardes P., Libório M.P. Multimethod to prioritize projects evaluated in different formats // MethodsX. 2021. No. 8. DOI: 10.1016/j.mex.2021.101371
21. Alamdari A.M., Jabarzadeh Y., Adams B., Samson D., Khanmohammadi S. An analytic network process model to prioritize supply chain risks in green residential megaprojects // Operations Management Research. 2023. No. 16 (1). DOI: 10.1007/s12063-022-00288-2

22. Беликов А.Б., Симонян В.В. Математическая обработка результатов геодезических измерений : уч. пос. 2-е изд. М. : НИУ МГСУ, 2016. 432 с.
23. Dvulit P., Savchuk S., Sosonka I. Accuracy estimation of site coordinates derived from GNSS-observations by non-classical error theory of measurements // *Geodesy and Geodynamics*. 2021; No. 12 (5). DOI: 10.1016/j.geog.2021.07.005

REFERENCES

1. Makhutov N.A., Permyakov V.N., Akhmetkhanov R.S. et al. *Risk analysis and ensuring the security of critical facilities of the petrochemical complex : a textbook*. Tyumen, TSOGU, 2013; 560. (rus).
2. Gvozdev E.V. Setting a problem on the rational allocation of a resource, intended to ensure integrated enterprise security. *Real Estate: Economics, Management*. 2023; 2:50-55. DOI: 10.22337/2073-8412-2023-2-50-55
3. Gvozdev E.V. On the assessment of the state of integrated safety at the enterprises of the Russian oil and gas complex. *Pozharovzryvobezopasnost'/Fire and Explosion Safety*. 2022; 31(1):49-64. DOI: 10.22227/0869-7493.2022.31.01.49-64 (rus).
4. Gvozdev E.V. Development of risk management methodology at explosion- and fire-hazardous facilities of enterprises. *Occupational safety in industry*. 2023; 8:61-69. DOI: 10.24000/0409-2961-2023-8-61-69 (rus).
5. Gvozdev E.V. Formulation and solution of the task of developing a comprehensive safety system at explosion- and fire-hazardous production facilities of enterprises. *Occupational Safety in Industry*. 2023; 10:45-53. DOI: 10.24000/0409-2961-2023-10-45-53 (rus).
6. Gvozdev E.V. Management of complex security of enterprises using the symbolic method. *Real Estate: Economics, Management*. 2023; 4:48-53. DOI: 10.22337/2073-8412-2023-4-48-53
7. Ghosh S., Zaboli A., Hong J., Kwon J. An integrated approach of threat analysis for autonomous vehicles perception system. *IEEE Access*, 11. 2023; (99):1-1. DOI: 10.1109/ACCESS.2023.3243906
8. Angermeier D., Wester H., Beilke K., Hansch G., Eichler J. Security risk assessments: modeling and risk level propagation. *ACM Transactions on Cyber-Physical Systems*. 2023; 7(1). DOI: 10.1145/3569458
9. Stroykov G.A., Babyr N.V., Ilin I.V., Marchenko R.S. System of comprehensive assessment of project risks in energy industry. *International Journal of Engineering, Transactions A: Basics*. 2021; 34(7). DOI: 10.5829/IJE.2021.34.07A.22
10. Srikrishnan V., Lafferty D.C., Wong T.E., Lamontagne J.R., Quinn J.D., Sharma S. et al. Uncertainty analysis in multi-sector systems: Considerations for risk analysis, projection, and planning for complex systems. *Earth's Future*. 2022; 10(8). DOI: 10.1029/2021EF002644
11. Niazi M.A. Introduction to the modeling and analysis of complex systems : a review. *Complex Adaptive Systems Modeling*. 2016; 4(1). DOI: 10.1186/s40294-016-0015-x
12. Bjerga T., Aven T., Zio E. Uncertainty treatment in risk analysis of complex systems: The cases of STAMP and FRAM. *Reliability Engineering and System Safety*. 2016; 156. DOI: 10.1016/j.res.2016.08.004
13. Mbuli N., Mathonsi M., Seitshiro M., Pretorius J.H.C. Decomposition forecasting methods : a review of applications in power systems. *Energy Reports*. 2020; 6. DOI: 10.1016/j.egyr.2020.11.238
14. Kim W., Katipamula S. A review of fault detection and diagnostics methods for building systems. *Science and Technology for the Built Environment*. 2018; 24(1). DOI: 10.1080/23744731.2017.1318008
15. Witelski T., Bowen M. Methods of mathematical modelling: Continuous systems and differential equations. *Methods of Mathematical Modelling: Continuous Systems and Differential Equations*. 2015. DOI: 10.1007/978-3-319-23042-9
16. Judd K.L. Chapter 12. Approximation, perturbation, and projection methods in economic analysis. *Handbook of Computational Economics*. 1996; 1. DOI: 10.1016/S1574-0021(96)01014-3
17. Han Z.Y., Weng W.G. Comparison study on qualitative and quantitative risk assessment methods for urban natural gas pipeline network. *Journal of Hazardous Materials*. 2011; 189(1-2). DOI: 10.1016/j.jhazmat.2011.02.067
18. Blumberg V.A., Glushchenko V.F. *Which solution is better? The method of prioritization*. Leningrad, Lenizdat, 1982; 160. (rus).
19. Bapat R.B. A max version of the Perron-Frobenius theorem. *Linear Algebra and Its Applications*. 1998; 275-276. DOI: 10.1016/S0024-3795(97)10057-X
20. Ramalho F.D., Silva I.S., Ekel P.Y., Martins C.A.P. da S., Bernardes P., Libório M.P. Multimethod to prioritize projects evaluated in different formats. *MethodsX*. 2021; 8. DOI: 10.1016/j.mex.2021.101371
21. Alamdari A.M., Jabarzadeh Y., Adams B., Samson D., Khanmohammadi S. An analytic network process model to prioritize supply chain risks in green residential megaprojects. *Operations Management Research*. 2023; 16(1). DOI: 10.1007/s12063-022-00288-2
22. Belikov A.B., Simonyan V.V. Mathematical processing of the results of geodetic measurements : a textbook. *Ministry of Education and Science of the Russian Federation. The Federation. National Research. Moscow State University Builds. Un-T*. 2nd ed. Moscow, NRU MGSU, 2016; 432. (rus).

23. Dvulit P., Savchuk S., Sosonka I. Accuracy estimation of site coordinates derived from GNSS-observations by non-classical error theory of measurements. *Geodesy and Geodynamics*. 2021; 12(5). DOI: 10.1016/j.geog.2021.07.005

Поступила 29.12.2023, после доработки 09.02.2024;

принята к публикации 16.02.2024

Received December 29, 2023; Received in revised form February 9, 2024;

Accepted February 16, 2024

Информация об авторе

ГВОЗДЕВ Евгений Владимирович, канд. техн. наук, доцент кафедры общей и прикладной физики, Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет, Россия, 129337, г. Москва, Ярославское шоссе, 26; ПИНЦ 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 the Department of General and Applied Physics, National Research Moscow State University of Civil Engineering, Yaroslavskoe shosse, 26, Moscow, 129337, Russian Federation; ПИНЦ ID: 296055; ORCID: 0000-0002-3679-1065; e-mail: evgvozdev@mail.ru

ПРАВИЛА ДЛЯ АВТОРОВ!

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

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

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

Редакция просит авторов при подготовке рукописи руководствоваться изложенными ниже правилами.

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

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

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

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

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

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

Материал статьи должен излагаться в следующем порядке.

2.1. Номер УДК (универсальная десятичная классификация).

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

2.3. Информация об авторах.

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

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

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

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

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

2.3.3. ORCID, Researcher ID, Scopus Author ID.

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

В описании источников необходимо указывать всех авторов.

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

При составлении References необходимо следовать схеме:

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

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

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

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

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

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

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