

3-2025

FIRE SAFETY ПОЖАРОВЗРЫВО-

БЕЗОПАСНОСТЬ



НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКИЙ ЖУРНАЛ

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

ВЗРЫВООПАСНОСТЬ
ЛОКАЛЬНОЙ ДЕФОРМАЦИИ
ПРОСТРАНСТВА



КОМПЛЕКСНАЯ БЕЗОПАСНОСТЬ

пожарная • промышленная • производственная • экологическая



УЧРЕДИТЕЛЬ и ИЗДАТЕЛЬ —

ФГБОУ ВО «Национальный
исследовательский
Московский государственный
строительный университет»

Адрес:

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

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

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

РЕДАКЦИЯ:

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

Адрес редакции:

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

Адрес для переписки:

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

E-mail: info@fire-smi.ru

https://www.fire-smi.ru

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

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

Подписано в печать 27.06.2025.

Выход в свет 30.06.2025.

Формат 60 × 84 1/8. Тираж 2000 экз.

Бумага мелованная матовая.

Печать офсетная. Цена свободная.

Распространяется по подписке.

Отпечатано в типографии

Издательства МИСИ – МГСУ

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

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

ГЛАВНЫЙ РЕДАКТОР:

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

ЗАМ. ГЛАВНОГО РЕДАКТОРА:

Мольков В.В., д. т. н., профессор (Ольстерский университет, Ньютаунбери, 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

CONTENTS

МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ, ЧИСЛЕННЫЕ МЕТОДЫ И КОМПЛЕКСЫ ПРОГРАММ

MATHEMATICAL MODELING, NUMERICAL METHODS AND PROGRAM COMPLEXES

О.С. МАЛЮТИН, М.Б. ШМЫРЕВА, С.В. БАБЕНЫШЕВ
Алгоритм расчета и построения формы площади пожара
в соответствии с тактической моделью расчета

5

O.S. MALYUTIN, M.B. SHMYREVA, S.V. BABENYSHEV
An algorithm for calculating and constructing the fire area shape
according to the tactical calculation model

БЕЗОПАСНОСТЬ ВЕЩЕСТВ И МАТЕРИАЛОВ

SAFETY OF SUBSTANCES AND MATERIALS

Н.И. КОНСТАНТИНОВА, А.В. ЗУБАНЬ, С.В. ПУЗАЧ
Исследование пожарной опасности текстильных материалов
и изделий мягкой мебели для внутренней отделки
пассажирских вагонов

22

N.I. KONSTANTINOVA, A.V. ZUBAN, S.V. PUZACH
Investigation of the fire hazard of textile materials and soft
furniture products for interior decoration of passenger
wagons

ПРОЦЕССЫ ГОРЕНИЯ, ДЕТОНАЦИИ И ВЗРЫВА

COMBUSTION, DETONATION AND EXPLOSION PROCESSES

Н.Л. ПОЛЕТАЕВ
Взрывоопасность локальной деформации
пространства

34

N.L. POLETAEV
Explosion hazard of local space
deformation

БЕЗОПАСНОСТЬ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ И ОБОРУДОВАНИЯ

SAFETY OF TECHNOLOGICAL PROCESSES AND EQUIPMENT

И.С. МАКАРОВ, А.А. ДЬЯКОНОВ, Н.Н. ЛАЗАРЕВА,
А.А. СИНЯКОВ, Е.Г. ПАРЕНКО
Разработка морозостойких уплотнительных колец
для обеспечения противопожарной безопасности
в Арктических регионах РФ

40

I.S. MAKAROV, A.A. DYAKONOV, N.N. LAZAREVA,
A.A. SINYAKOV, E.G. PARENKO
Development of frost-resistant sealing rings
for fire safety in the Arctic regions
of the Russian Federation

БЕЗОПАСНОСТЬ ВЕЩЕСТВ И МАТЕРИАЛОВ

SAFETY OF SUBSTANCES AND MATERIALS

Д.Ф. САДЫКОВА, Е.М. ГОТЛИБ, А.Г. СОКОЛОВА
Динамические механические свойства
пластифицированных поливинилхлоридных
композиций, наполненных силикатами

50

D.F. SADYKOVA, E.M. GOTLIB, A.G. SOKOLOV
Dynamic mechanical properties
of plasticized polyvinylchloride composites
filled with silicates

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

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

10 14 10	3 24 34 24 3	10 44 62 44 10
14 100 14	4 34 100 34 4	14 62 100 62 14
10 14 10	3 24 34 24 3	10 44 62 44 10
	1 3 4 3 1	3 10 14 10 3
Шаг 1	Шаг 2	Шаг 3
1 3 4 3 1	1 5 11 14 11 5 1	1 3 4 3 1
1 11 25 34 25 11 1	5 25 55 71 55 25 5	4 16 30 38 30 16 4
3 25 77 100 77 25 3	11 55 100 100 100 55 11	1 16 53 100 100 100 53 16
4 34 100 100 100 34 4	14 71 100 100 100 71 14	3 30 100 100 100 100 30
3 25 77 100 77 25 3	11 55 100 100 100 55 11	4 38 100 100 100 100 38
1 11 25 34 25 11 1	5 25 55 71 55 25 5	1 16 53 100 100 100 53 16
1 3 4 3 1	1 5 11 14 11 5 1	4 16 30 38 30 16 4
Шаг 4	Шаг 5	Шаг 6
1 3 4 3 1	1 5 11 14 11 5 1	1 3 4 3 1

Алгоритм расчета и построения формы площади пожара



Пожарная опасность текстильных материалов в пассажирских вагонах

Стр. 5

Стр. 22



Взрывоопасность локальной деформации пространства

Стр. 34



Стр. 40

Разработка морозостойких уплотнительных колец



Свойства пластифицированных поливинилхлоридных композиций

Стр. 50

КОМПЛЕКСНАЯ БЕЗОПАСНОСТЬ

ПОЖАРНАЯ • ПРОМЫШЛЕННАЯ • ПРОИЗВОДСТВЕННАЯ • ЭКОЛОГИЧЕСКАЯ



FOUNDER and PUBLISHER —

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

Address:

26 Yaroslavskoe shosse, Moscow,
129337, Russia

Journal founded in 1992,
issued 6 times per year.

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

EDITORIAL STAFF:

Executive editor **Tabekova A.R.**

Editor **Korzukhina L.B.**

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

Corrector **Ermikhina O.V.**

Layout **Aleynikova Y.Z.**

Address of Editorial Staff:

26 Yaroslavskoe shosse, Moscow,
129337, Russia

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

E-mail: info@fire-smi.ru

https://www.fire-smi.ru

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

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

Signed for printing 27.06.2025.
Date of publication 30.06.2025.
Format is 60 × 84 1/8.
Printing is 2000 copies.
Chalk-overlay mat paper.
Offset printing. Free price.
Journal sells subscription.

Printing house of the Publishing house
MISI – 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. 2025. Т. 34. № 3. С. 5–21
POZHAROVZRYVOBEZOPASNOST/FIRE AND EXPLOSION SAFETY. 2025; 34(3):5-21

НАУЧНАЯ СТАТЬЯ/RESEARCH PAPER

УДК 614.84

<https://doi.org/10.22227/0869-7493.2025.34.03.5-21>

Алгоритм расчета и построения формы площади пожара в соответствии с тактической моделью расчета

Олег Сергеевич Малютин, Марианна Борисовна Шмырева ✉, Сергей Валерьевич Бабенышев

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

АННОТАЦИЯ

Введение. Управление боевыми действиями по тушению пожаров требует учета множества факторов, включая форму и размер площади пожара. В оперативной деятельности подразделений пожарной охраны используются упрощенные методы, такие как тактическая модель расчета площади пожара, которая, однако, сложна для реализации в программном обеспечении, особенно применительно к объектам со сложной конфигурацией ограждающих конструкций.

Цели и задачи. Цель работы — получение знаний в области разработки алгоритмов, реализующих тактическую модель расчета формы и площади пожара. Задачи включают анализ существующих методов, разработку алгоритма с учетом времени развития пожара, конфигурации ограждающих конструкций и влияния пожарных стволов, а также создание инструмента для автоматизации расчетов.

Материалы и методы. В основе алгоритма — модифицированный алгоритм Ли, применяемый для моделирования распространения огня в дискретном пространстве. Учитывается линейная скорость распространения огня, зависящая от времени развития пожара и подачи пожарных стволов. Разработан метод опционального перехода от круглой к прямоугольной форме пожара при достижении стен и учет влияния стволов на развитие пожара.

Результаты и обсуждение. Алгоритм показал высокую точность (99 %) в построении формы пожара. Переход к прямоугольной форме при достижении стен соответствует тактической модели. Учет пожарных стволов позволяет моделировать их влияние на развитие пожара. Сравнение с геометрическим методом показало различия в площади пожара менее 1 %. Основные достоинства: соответствие правилам расчетов, применимость к объектам любой сложности, наглядность, учет влияния стволов. Недостатки: неточности контура зоны горения и ускорение развития пожара в сужающихся стенах.

Выводы. Алгоритм эффективен для моделирования площади пожара в соответствии с тактической моделью. Подтверждена гипотеза о возможности использования модифицированного алгоритма Ли. Для дальнейшего развития рекомендуется кроссплатформенная реализация, оптимизация быстродействия и дополнительные эксперименты. Подход применим для прогнозирования оперативной обстановки на объектах различного назначения.

Ключевые слова: площадь пожара; Графис-Тактик; моделирование

Для цитирования: Малютин О.С., Шмырева М.Б., Бабенышев С.В. Алгоритм расчета и построения формы площади пожара в соответствии с тактической моделью расчета // Пожаровзрывобезопасность/Fire and Explosion Safety. 2025. Т. 34. № 3. С. 5–21. DOI: 10.22227/0869-7493.2024.34.03.5–21

✉ Шмырева Марианна Борисовна, e-mail: ntc@sibpsa.ru

An algorithm for calculating and constructing the fire area shape according to the tactical calculation model

Oleg S. Malyutin, Marianna B. Shmyreva ✉, Sergey V. Babenyshev

Siberian Fire and Rescue Academy of the Ministry of Russian Federation for Civil Defence, Emergencies and Elimination on Consequences of Natural Disasters, Zheleznogorsk, Russian Federation

ABSTRACT

Introduction. Managing firefighting operations requires considering numerous factors, including the shape and size of the fire area. In operational practice, simplified methods such as the tactical fire area calculation model are used. However, implementing this model in software is challenging, especially for objects with complex enclosing structures.

Goals and objectives. The goal of this work is to develop algorithms implementing the tactical model for calculating the shape and area of a fire. The tasks include analyzing existing methods, developing an algorithm that

accounts for fire spread time, the configuration of enclosing structures, and the influence of firefighting equipment, as well as creating a tool for automating calculations.

Materials and methods. The algorithm is based on a modified Lee algorithm, used to model fire spread in a discrete space. It considers the linear fire spread rate, which depends on the fire development time and the deployment of firefighting equipment. A method for transitioning from a circular to a rectangular fire shape upon reaching walls was developed, along with a mechanism to account for the influence of firefighting equipment on fire progression.

Results and discussion. The algorithm demonstrated high accuracy (99 %) in constructing the fire area shape. The transition to a rectangular shape upon reaching walls aligns with the tactical model. Accounting for firefighting equipment allows modelling its impact on fire development. Comparison with the geometric method showed differences in fire area of less than 1 %. Key advantages include compliance with calculation rules, applicability to objects of any complexity, clarity, and consideration of equipment influence. Disadvantages include inaccuracies in the fire zone contour and accelerated fire spread in narrowing walls.

Conclusions. The algorithm is effective for modelling fire areas in accordance with the tactical model. The hypothesis regarding the use of a modified Lee algorithm is confirmed. For further development, cross-platform implementation, performance optimization, and additional experiments are recommended. The approach is applicable for predicting operational scenarios at facilities of various purposes.

Keywords: fire area; GraFiS-Tactic; modelling

For citation: Malyutin O.S., Shmyreva M.B., Babenyshev S.V. An algorithm for calculating and constructing the fire area shape according to the tactical calculation model. *Pozharovzryvobezopasnost/Fire and Explosion Safety*. 2025; 34(3):5-21. DOI: 10.22227/0869-7493.2025.34.03.5-21 (rus).

✉ Marianna Borisovna Shmyreva, e-mail: ntc@sibpsa.ru

Введение

Управление боевыми действиями по тушению пожаров является сложнейшей задачей, требующей учета большого количества факторов, связанных с техническими свойствами объекта, физико-химическими особенностями развития пожара и характеристиками привлеченных сил и средств пожарной охраны. Сложность такой системы управления диктует и множество направлений приложения управленческих воздействий с целью успешного решения основной боевой задачи — спасения людей, достижения локализации и ликвидации пожара в кратчайшие сроки (приказ МЧС России¹). Для адекватного выбора управленческих решений требуется не только располагать детальной информацией о складывающейся на пожаре обстановке, но и иметь представление, как она может развиваться в зависимости от тех или иных условий. И главную роль здесь играет форма и размер площади пожара [1].

В оперативной деятельности нет возможности применять сложные модели и связанные с ними программные расчетные комплексы, такие как FDS и Pyrosim [2]. Методы прогнозирования развития обстановки на пожаре, предназначенные для применения в оперативной деятельности, должны быть максимально простыми при сохранении приемлемой точности получаемых результатов. В пожарной тактике для этой цели обычно применяется упрощенный метод расчета площади пожара, который далее будет именоваться «Тактическая модель».

Тактическая модель хорошо известна в пожарной охране России и широко применяется при

проведении расчетов требуемого количества сил и средств непосредственно на месте тушения пожара. Но в большей степени она применяется при составлении документов предварительного планирования боевых действий по тушению пожаров (далее — БДТП), при составлении методических разработок на проведение занятий с личным составом пожарной охраны, анализе пожаров и т.д. [1]. То есть основным назначением тактической модели является предварительная оценка возможной обстановки на месте пожара исходя из конфигурации ограждающих конструкций и некоторого набора параметров распространения пожара, определяемых характером горючей нагрузки (линейная скорость распространения огня, требуемая интенсивность подачи огнетушащих веществ).

В работе [3] показаны достоинства и недостатки тактической модели. Основным ее достоинством является простота. Это свойство позволяет проводить расчеты без привлечения мощных программно-аппаратных комплексов. Закономерности, заложенные в модели, тривиальны и могут быть реализованы с использованием простейших программных средств, таких как табличные редакторы и, потенциально, скриптовые языки программирования (VBA, Python)².

Это соображение делает тактическую модель привлекательной для применения не только непосредственно при тушении пожаров. Она с успехом может быть применена при моделировании параметров пожара при разработке более сложных моделей прогнозирования оперативной обстановки на территории населенных пунктов и предприятий. Так,

¹ Боевой устав подразделений пожарной охраны, определяющий порядок организации тушения пожаров и проведения аварийно-спасательных работ : Приказ МЧС России от 16.10.2017 № 444.

² VanderPlas J. Python Data Science Handbook. Essential Tools For Working With Data. O' Reilly Media, 2016. 548 p. URL: <https://jakevdp.github.io/PythonDataScienceHandbook>

например, в СП 11.131300.2009³ в основу методики определения максимально допустимого расстояния от объекта предполагаемого пожара до ближайшего пожара положена несколько модифицированная тактическая модель [4].

Несмотря на простоту самой тактической модели ее реализация в виде готового к применению приложения для ЭВМ представляет нетривиальную задачу, в том числе и благодаря допущениям и огрублениям расчета, обуславливающего ее простоту. Так, расчет достаточно просто проводить для зданий и помещений прямоугольных форм, однако, в случае сложной конфигурации ограждающих конструкций расчет становится затруднительным. Кроме того, в тактической модели не описывается, каким способом следует проводить расчет в ряде частных случаев (переход к прямоугольным формам в случае незамкнутых ограждающих конструкций и наличия дверных проемов, наличие круглых стен и стен, сходящихся под углами, отличными от прямого и т.д.) [3]. Создание некоего инструмента для решения задачи автоматического моделирования формы и площади пожара с использованием тактической модели позволило бы существенно упростить проведение расчетов применительно как к частным случаям пожаров, так и к сериям вычислительных экспериментов по прогнозированию возможных сценариев развития пожара в рамках моделирования оперативной обстановки на территории населенных пунктов и промышленных предприятий.

Таким образом, объектом исследования, результаты которого приведены в данной статье, является тактическая модель расчета формы и площади пожара. Предметом исследования являются методы расчета и построения формы площади пожара в соответствии с тактической моделью расчета для произвольной формы ограждающих конструкций.

Цель работы — получение знаний в области разработки алгоритмов, реализующих тактическую модель расчета формы и площади пожара.

Известные решения

В отечественных публикациях впервые внимание к проблеме автоматизации расчета площади пожара и хода его тушения было привлечено в работах И.Н. Разливанова [5], предложившего использовать квадратную матрицу, описывающую конфигурацию ограждающих конструкций в сочетании с принципом Гюйгенса для расчета распространения фронта пожара. В работе также реализована упрощенная модель тушения пожара ручными пожарными стволами. В работах С.В. Субачева [6] предложена

стохастическая модель расчета площади пожара, отличающаяся вероятностным характером выбора загорающихся клеток и дополненная интегральной моделью пожара. В работе [7], предшествовавшей упомянутому исследованию, рассматривался геометрический подход к построению площади пожара с использованием модели распространения огня на основе методов теории графов, реализованный в автоматизированной информационно-графической системе ГраФиС-Тактик [8, 9]. Дальнейшее развитие последней привело к появлению подхода, схожего с работами [5, 6], но отличающегося использованием клеточного автомата.

Анализ отечественных работ показал, что наибольшей перспективностью с точки зрения создания алгоритма, реализующего тактическую модель расчета формы и площади пожара, обладает применение подхода, при котором пространство объекта пожара рассматривается как некоторая двухмерная решетка, состоящая из ячеек, отражающих наличие и характер горючей нагрузки, а также ограждающих конструкций. Задача построения площади пожара в таком пространстве может решаться с помощью алгоритмов поиска в ширину, например алгоритма Ли [10], модифицированного не для нахождения кратчайшего пути, а для построения зоны горения по контуру волны поиска. Схожее решение для задачи моделирования последствий аварийных выбросов было предложено в работе [11].

Среди зарубежных следует отметить работы⁴ [12], ориентированные в основном на моделирование природных пожаров. При этом в работе⁵ отмечаются перспективы применения геоинформационных технологий для решения задач моделирования пожаров. В работе [13] предлагается использование клеточных автоматов на основе гексагональной сетки. В докладе [14] приводятся сведения о применении методов машинного обучения для моделирования лесных пожаров. В работе [15] рассматривается метод моделирования пожаров в помещениях с использованием клеточных автоматов. Дальнейшее развитие результаты названной работы получили в статье [16] применительно к моделированию температуры в помещениях. В статье [17] авторы приводят сведения о подходах к визуализации и интерпретации результатов компьютерного моделирования пожаров

⁴ Gonzalez E.A., Leonor M.Ch.G. A Cellular Automaton Approach for Simulating Forest Fires // 9th Science and Technology Congress. De La Salle University Manila, Philippines, 2007. P. 8. URL: https://www.researchgate.net/publication/312529591_A_Cellular_Automaton_Approach_for_Simulating_Forest_Fires

⁵ Gazmeh H., Chehregan A., Alesheikh M.A., Karimi M. Modeling Forest Fire Spread using Cellular Automata, GIS and PSO // Geospatial Engineering Journal. 2013. No. 4 (13). Pp. 71–85. URL: https://www.researchgate.net/publication/262847654_Modeling_Forest_Fire_Spread_using_Cellular_Automata_GIS_and_PSO

³ СП 11.131300.2009. Места дислокации пожарных подразделений. Порядок и методика определения.

в помещениях. В публикации [18] приводятся сведения о методах расчета кромки природных пожаров с использованием методов компьютерного моделирования.

Таким образом основной гипотезой, рассматриваемой в исследовании, являлась идея о том, что построить форму площади пожара, соответствующую тактической модели и учитывающую время развития пожара и конфигурацию ограждающих конструкций, можно с использованием алгоритма Ли, модифицированного с учетом замечаний, приведенных в работе [19].

Материалы и методы

Алгоритм построения площади пожара в соответствии с тактической моделью расчета

Тактическая модель изначально создавалась для того, чтобы максимально упростить задачу построения площади пожара, что было продиктовано необходимостью создания инструмента для быстрой оценки оперативной обстановки на пожаре. Для этого был принят ряд принципиальных допущений:

- принимается, что горящая нагрузка равномерно распределена по всей площади объекта пожара и имеет одинаковые характеристики (линейная скорость распространения огня, требуемая интенсивность подачи воды) в любой отдельно взятой точке;
- изначально фронт пожара распространяется радиально от очага пожара, но при достижении ограждающих конструкций он переходит к прямоугольной форме (рис. 1);
- линейная скорость распространения огня зависит от времени подачи первых пожарных стволов: принимается равной половине табличного значения (в соответствии со справочными данными) [1] в первые 10 мин развития пожара и полной величине вплоть до момента подачи стволов;
- в качестве основного параметра для расчета требуемого расхода огнетушащих веществ (далее — ОТВ) принимается площадь тушения, определяемая условной глубиной тушения приборами подачи воды (5 м для ручных пожарных стволов и 10 для лафетных);
- в случае, если интенсивности подачи ОТВ недостаточно для тушения, линейная скорость распространения огня принимается равной половине табличного значения. Если интенсивности подачи ОТВ достаточно для тушения, рост площади горения прекращается.

Определить текущую линейную скорость распространения огня можно следующим образом [1].

При времени развития пожара менее 10 мин:

$$v_{\text{л}} = 0,5 \cdot v_{\text{л.т}} \quad (1)$$

где $v_{\text{л}}$ — расчетная линейная скорость распространения огня, м/мин;

$v_{\text{л.т}}$ — табличная линейная скорость распространения огня, м/мин.

При времени развития пожара свыше 10 мин и до момента введения пожарных стволов:

$$v_{\text{л}} = 1 \cdot v_{\text{л.т}} \quad (2)$$

При времени развития пожара свыше 10 мин и при условии, что пожарные стволы уже поданы, но их расхода ОТВ недостаточно для локализации пожара:

$$v_{\text{л}} = 0,5 \cdot v_{\text{л.т}} \quad (3)$$

При времени развития пожара свыше 10 мин и при условии, что пожарные стволы уже поданы, их расхода ОТВ достаточно для локализации пожара:

$$v_{\text{л}} = 0. \quad (4)$$

В алгоритме построения площади пожара вся зона объекта пожара рассматривается как дискретное пространство, состоящее из совокупности клеток. Каждая клетка может иметь одно из состояний: быть горячей нагрузкой (свободным пространством) или быть элементом ограждающих конструкций. По клеткам горячей нагрузки огонь может распространяться, по клеткам ограждающих конструкций — нет (рис. 2).

За основу взят алгоритм Ли, модифицированный для построения площади пожара по контуру распространения волн. Использование невзвешенного варианта этого алгоритма, как показывает [19], приводит к получению неправильных геометрических форм. Поэтому был использован взвешенный вариант алгоритма.

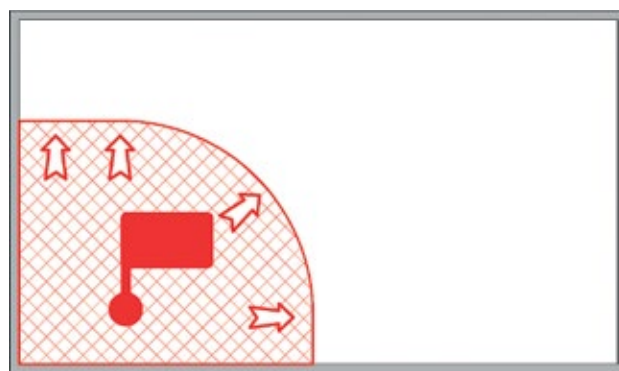


Рис. 1. Пример расчетной площади пожара, полученной с использованием тактической модели

Fig. 1. Example of the calculated fire area obtained using the tactical model

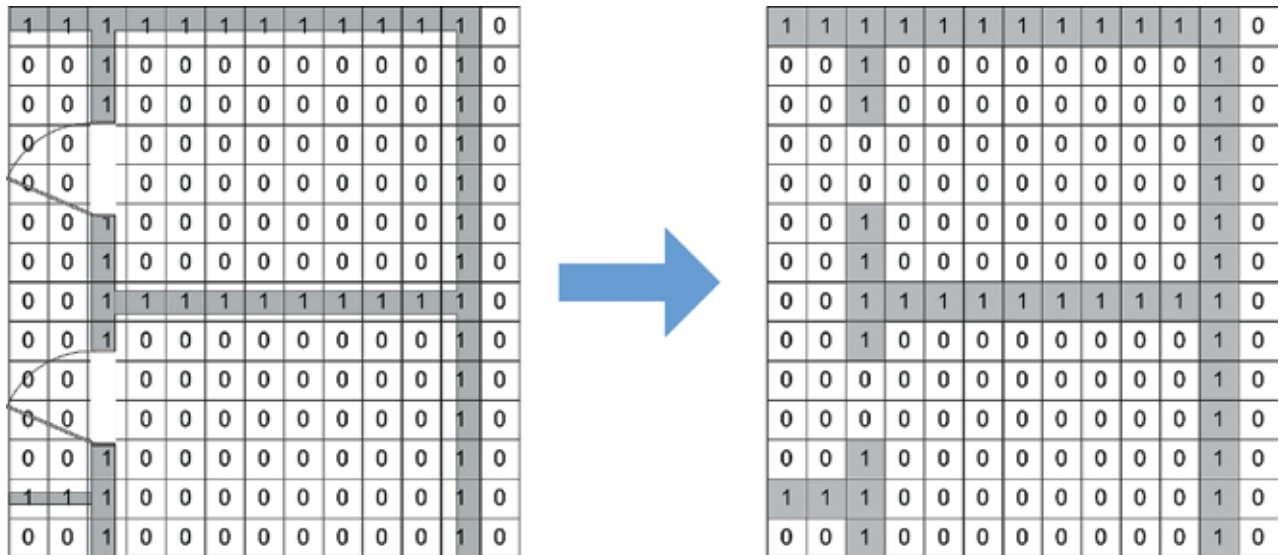


Рис. 2. Интерпретация ограждающих конструкций в матрице окружающего пространства: 1 — клетки непроницаемые для огня; 0 — клетки горючей нагрузки

Fig. 2. Interpretation of enclosing structures in the matrix of the surrounding space: 1 — cells impermeable to fire; 0 — cells of flammable load

Клетки могут загораться, приобретая значение мощности горения в некотором диапазоне, например от 0 до 100.

Если мощность горения клетки превышает некоторое значение, то она начинает распространять горение на смежные клетки горючей нагрузки в окрестности Фон Неймана порядка 1 [20]. При этом мощность передаваемого смежным клеткам горения P_N равна:

$$P_N = k \cdot P_C \cdot K_N, \quad (5)$$

где k — замедляющий коэффициент;

P_C — мощность горения текущей клетки, от которой выполняется расчет влияния на смежные;

K_N — коэффициент расположения клетки — для клеток, расположенных ортогонально по отно-

шению к текущей, $K_N = 0,1$, для клеток, расположенных по диагонали, $K_N = 0,1\sqrt{2} = 0,141$.

Значения K_N были получены исходя из теоремы Пифагора: если принять расстояние между центрами клеток, расположенными ортогонально, равным 1, то расстояние между клетками, расположенными по диагонали, будет равно $\sqrt{2} = 1,41$, а значит влияние, оказываемое на смежные клетки, будет обратно этим величинам (рис. 3). Другими словами, мощность, передаваемая ближе расположенным ортогональным клеткам, будет в 1,41 раза больше, чем мощность, передаваемая клеткам, расположенным по диагонали, так как они расположены дальше.

Расчет состояния клеток выполняется итеративно, т.е. пошагово.

На рис. 4 представлена блок-схема алгоритма расчета распространения горения.

При описании алгоритма использованы следующие термины и обозначения.

Шаг расчета — полный цикл расчета распространения горения для всех клеток коллекции текущей волны за одну итерацию (повторение).

Текущее время (T) — расчетное время модели.

Целевое время ($T_{\text{цель}}$) — время распространения пожара, для которого выполняется моделирование.

Коллекция клеток текущей волны — набор клеток, для которых на текущем шаге производится расчет.

Коллекция клеток новой волны — набор клеток, для которых необходимо будет произвести расчет на следующей итерации. В рамках алгоритма, после завершения каждого шага расчета для коллекции клеток текущей волны, коллекция клеток новой волны становится коллекцией текущей волны.

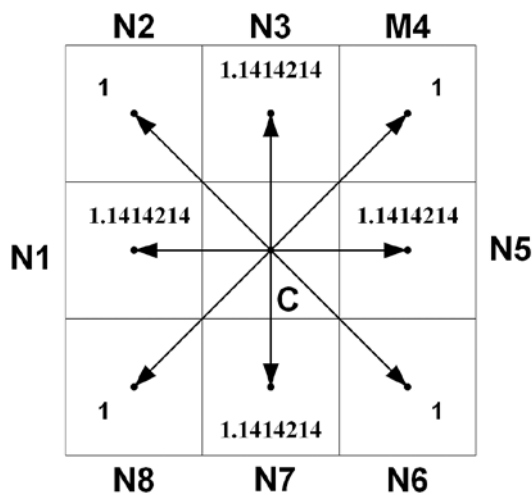


Рис. 3. Влияние расположения клеток на мощность горения

Fig. 3. Effect of cell arrangement on combustion power

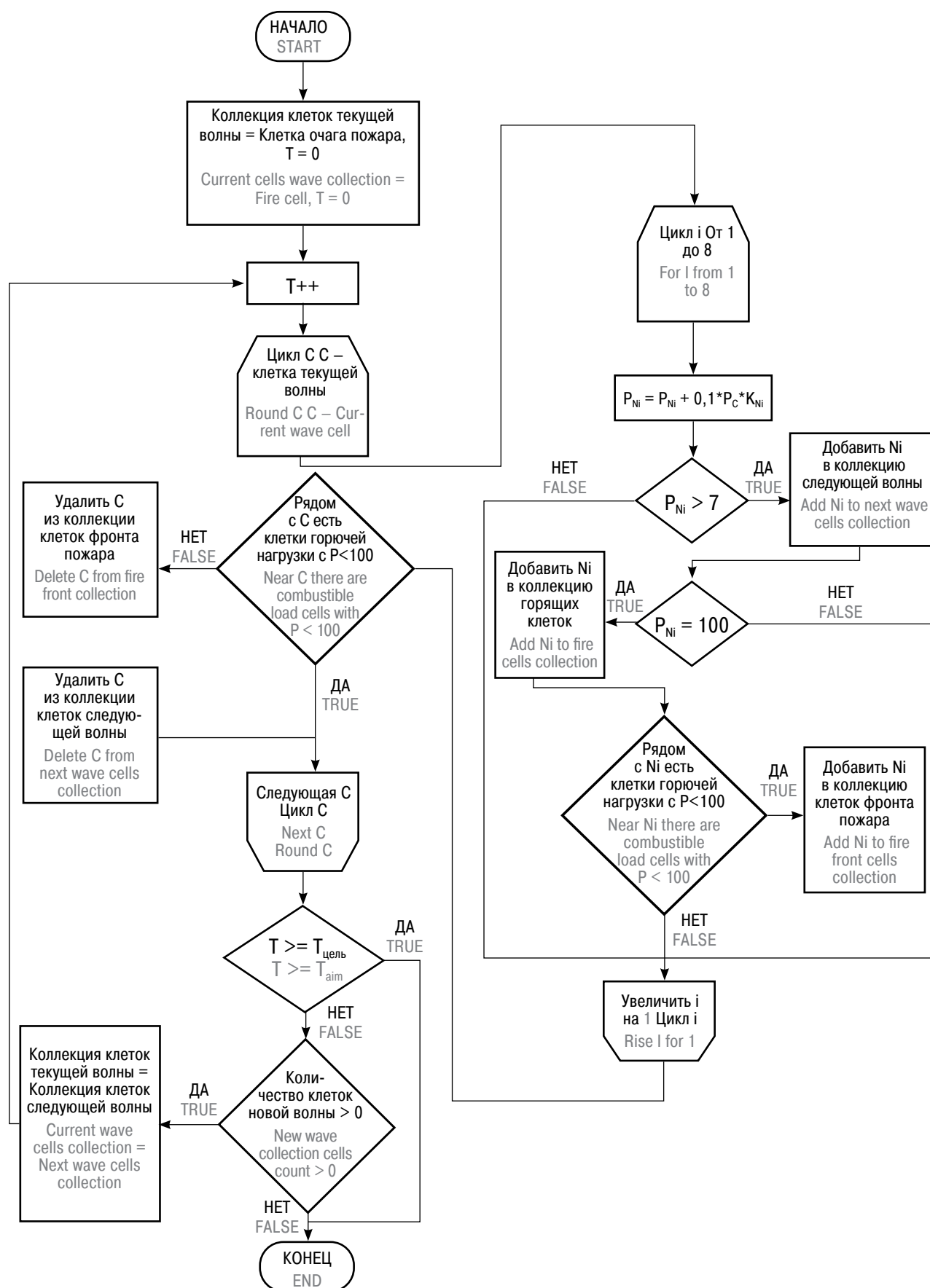


Рис. 4. Блок-схема алгоритма расчета распространения горения

Fig. 4. Block diagram of the algorithm for calculating the spread of combustion

Коллекция горящих клеток — коллекция всех клеток, горящих с максимальной мощностью. Сумма площадей всех клеток коллекции равна площади пожара по состоянию на данный шаг расчета.

Коллекция клеток фронта пожара — коллекция всех клеток, горящих с максимальной мощностью и при этом граничащих с хотя бы одной клеткой горючей нагрузки, у которой мощность горения меньше максимальной.

Клетка текущей волны (C) — клетка, для которой в данный момент выполняется расчет распространения мощности горения на соседние клетки.

Клетка, подверженная влиянию мощности горения — клетка, которой передается мощность горения рассматриваемой клетки текущей волны. В блок-схеме обозначается как N_i , где i — порядковый номер клетки согласно правилу, представленному на рис. 3.

P_C — мощность горения рассматриваемой клетки текущей волны.

P_{N_i} — мощность горения клетки, подверженной влиянию.

K_{N_i} — коэффициент расположения клетки (рис. 3).

Пользователь имеет возможность в любой момент остановить процесс расчета площади пожара, зафиксировав ее состояние. Также он имеет возможность продолжить расчет, используя в качестве стартового состояния зафиксированное ранее.

На рис. 5 приведена визуализация процесса моделирования распространения горения для 6 шагов и соответствующие мощности горения клеток.

На рис. 6 представлен результат расчета для 30 шагов. Видно, что форма пожара близка к правильному кругу. Вычислительные эксперименты с алгоритмом

показали, что точность построения округлой формы составляет 99 %.

После каждого шага расчета из всех клеток, горящих с максимальной мощностью, формируется фигура зоны горения для данного шага. Вычисляется ее площадь, путь, пройденный огнем для данного шага, а в случае наличия поданных на тушение пожарных стволов рассчитывается фактическая площадь тушения, требуемый и фактический расходы воды и оценивается возможность дальнейшего распространения огня.

Результат работы алгоритма с учетом ограждающих конструкций представлен на рис. 7.

Переход к прямоугольной форме

Согласно допущениям построения площади пожара в тактической модели, пожар, изначально распространяясь, принимает форму круга, но при достижении ограждающих конструкций переходит к прямоугольной форме (рис. 8).

Решения задачи перехода от круглой формы к прямоугольной ни в одном из рассмотренных источников предложено не было [1, 21]. Не удалось обнаружить решения данной задачи и за рамками контекста пожарной тактики. В связи с этим алгоритм расчета перехода к прямоугольной форме был разработан самостоятельно.

При разработке алгоритма за основу было принято следующее положение: при переходе к прямоугольной форме фронт площади пожара всегда перпендикулярен рассматриваемой ограждающей конструкции.

Таким образом, логика алгоритма заключается в следующем.

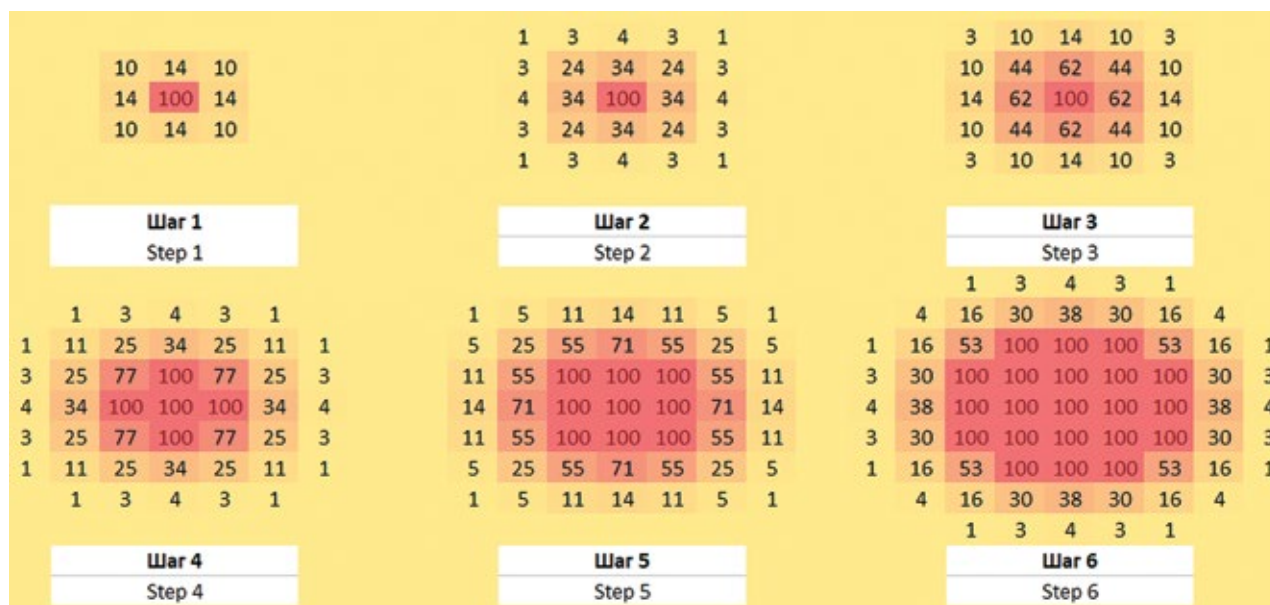


Рис. 5. Рост площади горения для 6 шагов
Fig. 5. Increase in burning area for 6 steps

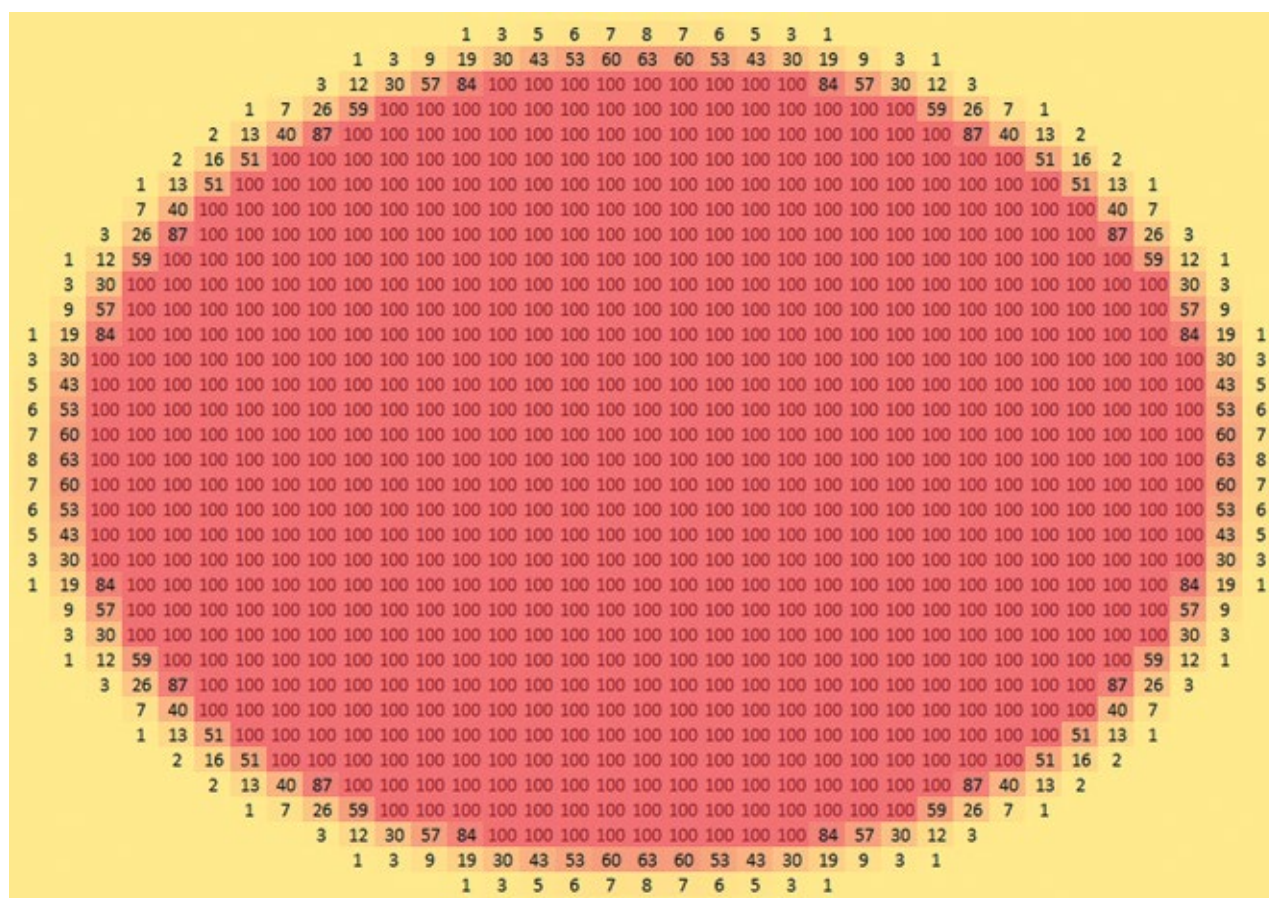


Рис. 6. Результат моделирования зоны горения дискретным клеточным автоматом для 30 шагов

Fig. 6. Result of combustion zone simulation by discrete cellular automaton for 30 steps

1. При достижении зоны горения ограждающей конструкции определяются клетки контакта. Признаком таких клеток является наличие в окрестностях одновременно горящих клеток, клеток ограждающих конструкций и не горящих клеток свободного пространства. На рис. 9 видно, что клетка 0 горит и имеет в своем окружении клетки ограждающих конструкций и клетки свободного пространства (далее — клетка контакта). Все прочие клетки дан-

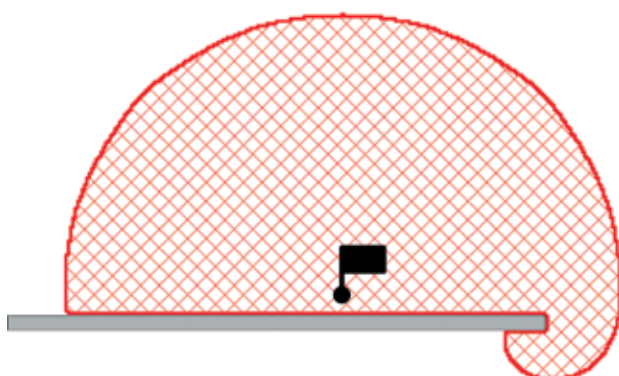


Рис. 7. Результат расчета зоны горения с учетом непроницаемости для огня ограждающих конструкций

Fig. 7. Result of calculation of the combustion zone taking into account the fire impermeability of enclosing structures

ным условиям не удовлетворяют: клетки 1 и 2 не имеют в своем окружении клеток открытого пространства, клетки 3 и 4 не имеют в своем окружении клеток ограждающих конструкций, клетка 5 не горит.

2. Начиная от клетки контакта для каждой следующей клетки вдоль ограждающей конструкции проводится проверка — коснется ли проведенный от нее луч, перпендикулярный ограждающей конструкции, зоны горения (рис. 10).

3. В случае если это происходит, все клетки, входящие в этот луч, считаются горящими.

4. Алгоритм заканчивает работу, если луч не коснется зоны горения (рис. 10) или очередная точка окажется за пределами ограждающей конструкции (рис. 11). После этого все клетки зоны, оказавшейся внутри перпендикуляра, добавляются в зону горения. На следующем шаге расчета горение продолжается уже от них.

Итог работы алгоритма в целом можно увидеть на рис. 12.

Учет поданных пожарных стволов

Одним из принципиальных преимуществ метода компьютерного моделирования является возмож-

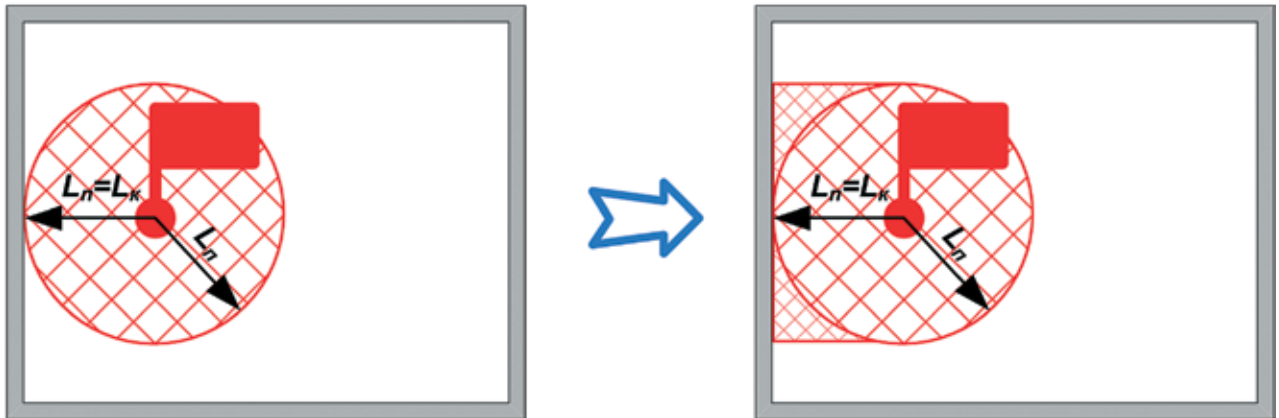


Рис. 8. Переход к прямоугольной форме пожара согласно тактической модели: L_n — путь, пройденный огнем; L_k — расстояние до ограждающих конструкций (стен)

Fig. 8. Transition to a rectangular fire shape, according to the tactical model: L_f — path traveled by fire; L_w — distance to enclosing structures (walls)

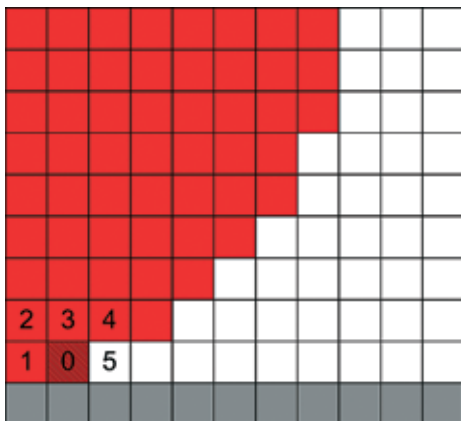


Рис. 9. Определение клетки контакта. Серым цветом выделены клетки ограждающих конструкций, красным — зоны горения, белым — не горящие клетки

Fig. 9. Definition of the contact cell. The cells of enclosing structures are highlighted in gray, the combustion zones are highlighted in red, and the cells that are not burning are highlighted in white

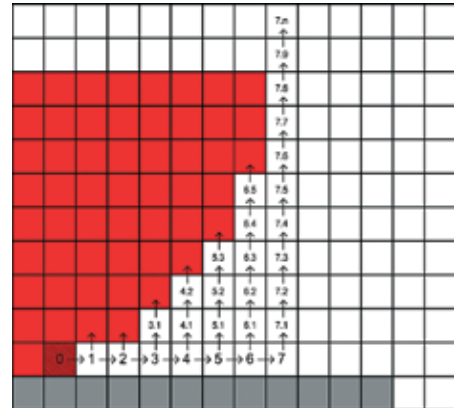


Рис. 10. Переход к прямоугольной форме. Алгоритм завершается, так как луч, перпендикулярный ограждающей конструкции из точки 7, не коснулся зоны горения

Fig. 10. Transition to a rectangular shape. The algorithm ends because the beam perpendicular to the enclosing structure from point 7 did not touch the combustion zone

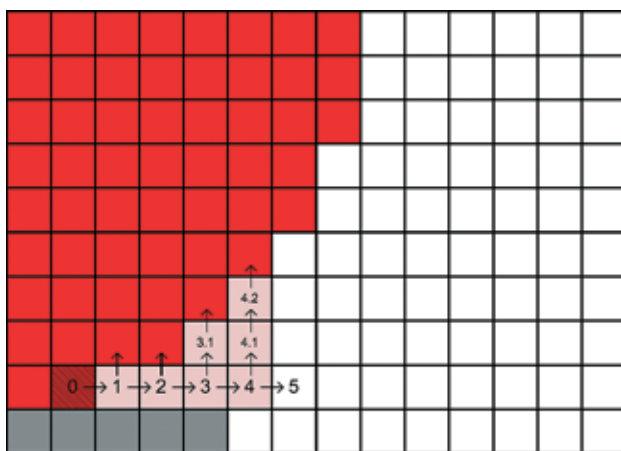


Рис. 11. Алгоритм завершается, так как клетка 5 не имеет в окружении клеток ограждающих конструкций

Fig. 11. The algorithm terminates because cell 5 has no enclosing structures in the surrounding cells

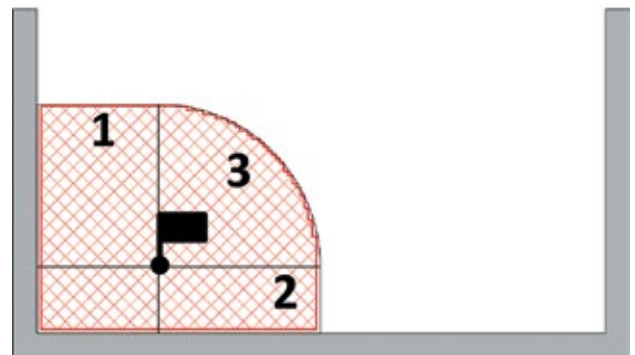


Рис. 12. Работа алгоритма перехода к прямоугольной форме. Сегменты 1 и 2 имеют фронт пожара в виде прямой линии, перпендикулярной ограждающим конструкциям. Сегмент 3 сохранил форму полуокруга

Fig. 12. Operation of the algorithm for transition to a rectangular shape. Segments 1 and 2 have a fire front in the form of a straight line perpendicular to the enclosing structures. Segment 3 retained the shape of a semicircle

ность учитывать влияние на развитие пожара поданных приборов подачи огнетушащих веществ.

Упрощенно алгоритм учета влияния поданных пожарных стволов на рост площади пожара выглядит следующим образом.

1. Перед запуском каждой сессии моделирования определяются расположение и свойства имеющихся пожарных стволов.

2. На каждом шаге моделирования осуществляется проверка пересечения фронта пожара с направлением действия каждого из пожарных стволов. Определяются обрабатываемые участки фронта пожара и стволы, работающие на каждом из них.

3. Для каждого обрабатываемого участка фронта пожара производится расчет размера фрагмента фактической площади тушения. При этом глубина тушения принимается: 5 м для ручных пожарных стволов и 10 м для лафетных пожарных стволов [1].

4. Для каждого обрабатываемого участка фронта пожара, исходя из указанного пользователем в процессе настройки значения требуемой интенсивности подачи воды, определяется требуемый расход воды Q_i^{TP} для локализации горения на данном фрагменте площади тушения.

5. Для каждого обрабатываемого участка фронта пожара суммируются расходы воды из стволов, работающих на данном участке — определяется фактический расход воды Q_i^F .

6. Для каждого обрабатываемого участка фронта пожара сравниваются фактический Q_i^F и требуемый расход воды Q_i^{TP} , если

$$Q_i^F \geq Q_i^{TP}.$$

Дальнейший расчет распространения огня на данном участке производиться не будет — $v_{li} = 0$, если

$$Q_i^F < Q_i^{TP},$$

где Q_i^F — фактический расход воды на i -м участке фронта пожара;

Q_i^{TP} — требуемый расход воды на i -м участке фронта пожара.

Дальнейший расчет распространения огня на данном участке будет производиться только на каждом втором шаге для эмуляции снижения скорости распространения огня в 2 раза в соответствии с формулами (1–4).

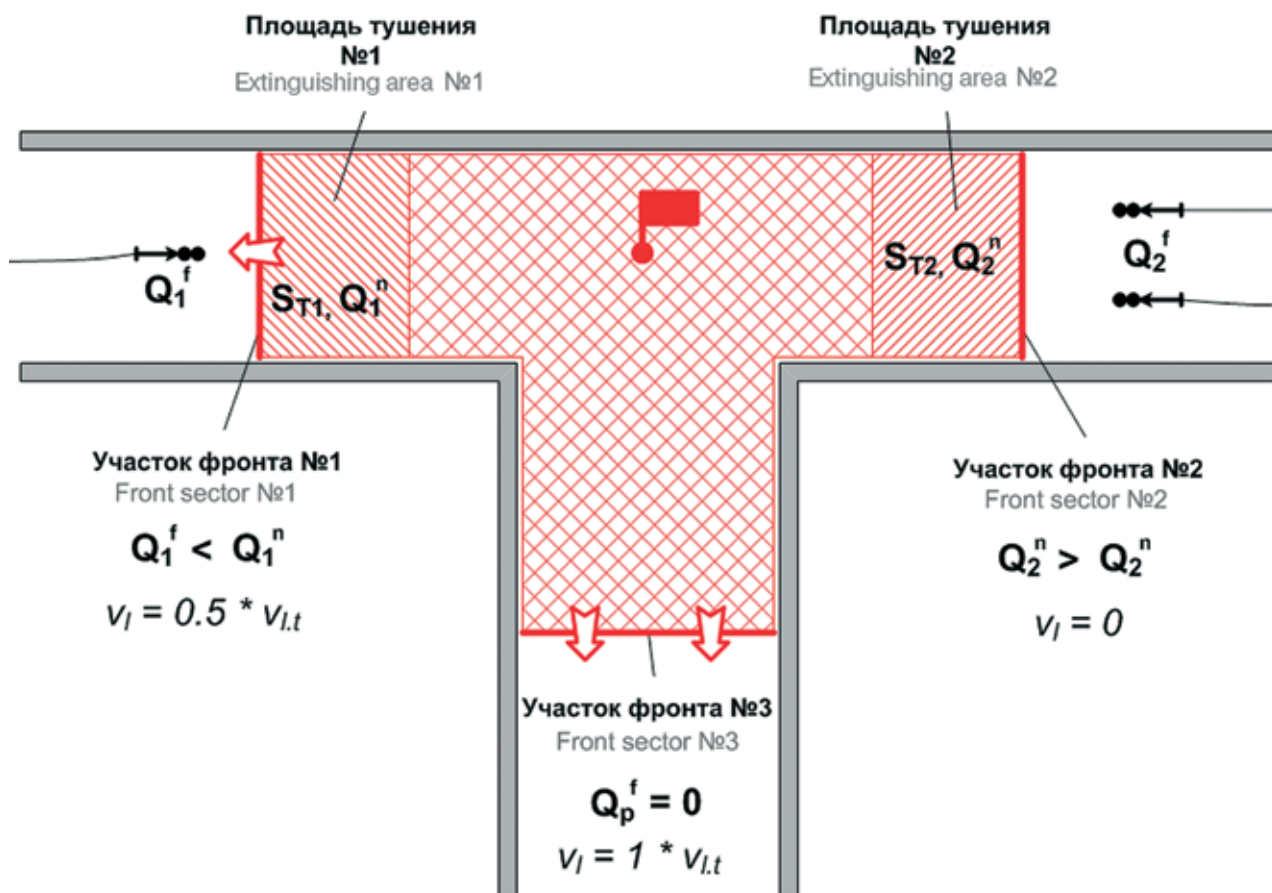


Рис. 13. Влияние расхода из поданных пожарных стволов на распространение пожара на различных участках фронта
Fig. 13. The influence of the flow rate from the supplied fire nozzles on the spread of fire in different areas of the front

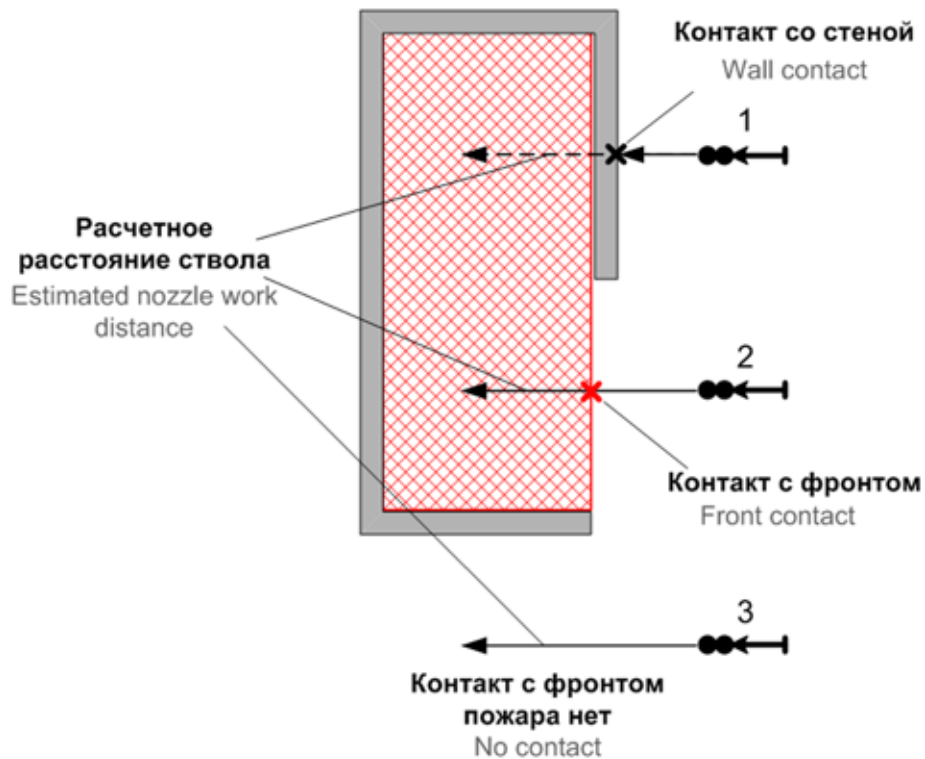


Рис. 14. Ствол № 1 не оказывает влияния на расчет, так как в направлении его работы находится стена. Ствол № 2 влияет на расчет, так как в пределах его расчетного расстояния находится фронт пожара. Ствол № 3 не оказывает влияния на расчет, так как в пределах его расчетного расстояния нет фронта пожара

Fig. 14. Nozzle No. 1 does not affect the calculation, because there is a wall in the direction of its operation. Nozzle No. 2 affects the calculation, because there is a fire front within its calculated distance. Nozzle No. 3 does not affect the calculation, because there is no fire front within its calculated distance

Рассмотрим пример расчета распространения пожара с учетом влияния поданных пожарных стволов, представленный на рис. 13.

На рис. 13 можно увидеть, какое влияние окажет суммарная производительность (фактический расход воды) поданных пожарных стволов:

- на участке фронта пожара № 1 подан один пожарный ствол. Расхода воды недостаточно для прекращения распространения горения на данном направлении. Распространение горения в дальнейшем будет происходить с половиной табличного значения ($v_d = 0,5 \cdot v_{д.т}$);
- на участке фронта пожара № 2 подано два пожарных ствола. Расхода воды достаточно для прекращения распространения огня на данном направлении ($v_d = 0$);
- на участке фронта пожара № 3 стволов не подано — огонь в данном направлении продолжит распространяться ($v_d = 1 \cdot v_{д.т}$).

Необходимо отметить, что ввиду учета влияния приборов фактический путь, пройденный огнем, может оказаться меньше расчетного. При этом он может отличаться для различных участков фронта пожара. Поэтому в случае с расчетом формы площади пожара методом компьютерного моделирова-

ния полагаться на расчетное значение этого параметра как на показатель развития пожара не следует.

Учет влияния стволов на фронт пожара осуществляется следующим образом (рис. 14). От ствола строится условная прямая в направлении работы ствола. В случае если прямая пересекается с фронтом пожара, то считается, что ствол работает на тушение. В случае же если прямая пересекается с фигурой ограждающих конструкций, считается, что ствол находится в другом помещении и вода, подаваемая им, в зону горения не попадает. Такой ствол в расчете не учитывается.

Длина расчетного расстояния работы ствола по умолчанию равна глубине тушения стволов: 5 для ручных и 10 м для лафетных.

Пример расчета и сравнение результатов, полученных методами расчета и построения формы площади пожара

Для сравнения описанных в предыдущих разделах методов произведем расчеты обоими методами на конкретном примере.

Для помещения, представленного на рис. 15, был проведен расчет для следующих условий:

- линейная скорость распространения огня — 1 м/мин;

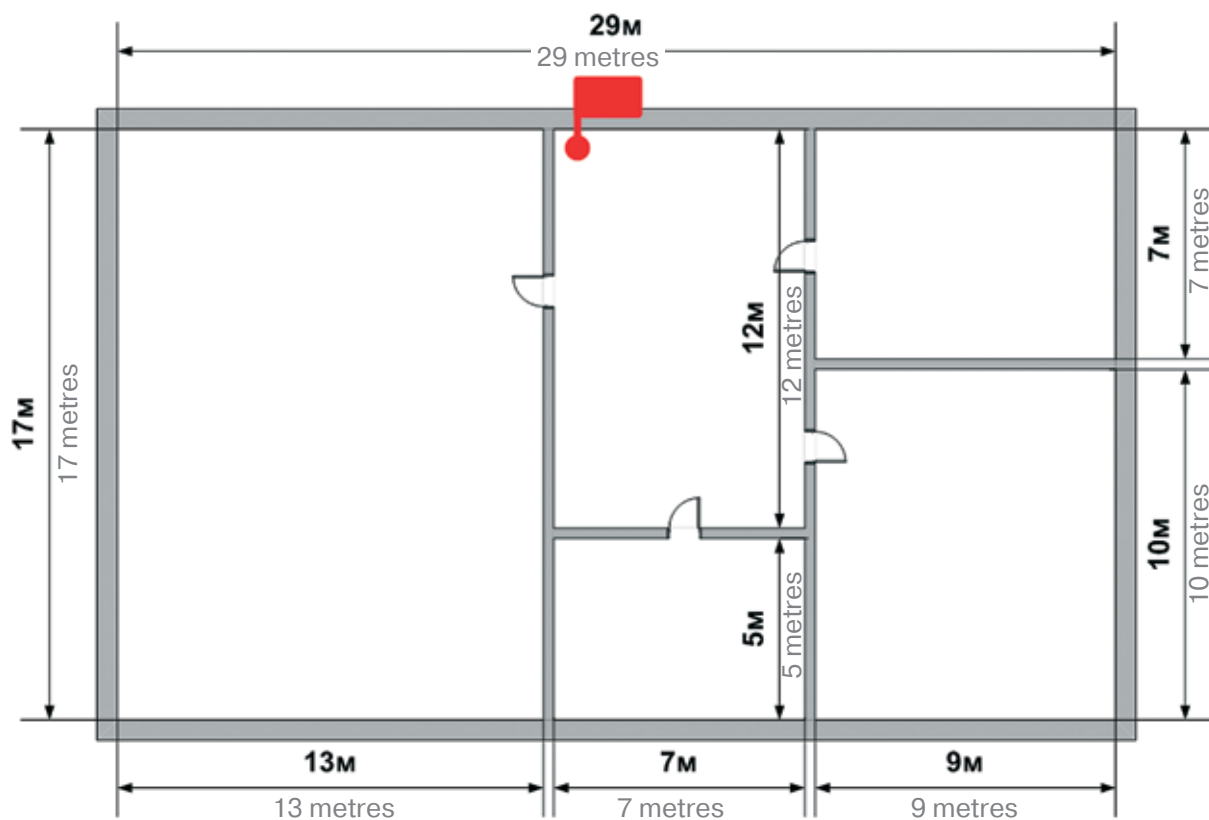


Рис. 15. Конфигурация ограждающих конструкций для расчета
Fig. 15. Configuration of enclosing structures for calculation

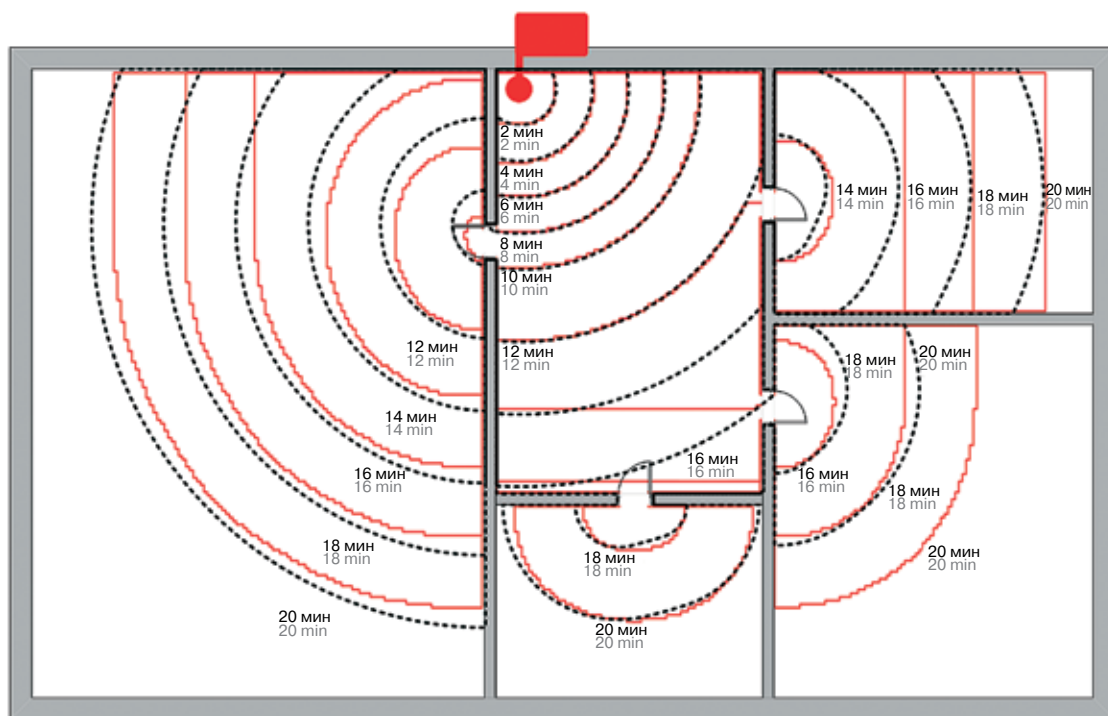


Рис. 16. Сравнение форм площади пожара, полученных с использованием различных методов расчета. Красная сплошная линия — площадь, полученная методом компьютерного моделирования. Черная пунктирная линия — площадь, полученная геометрическим методом
Fig. 16. Comparison of fire area shapes obtained using different calculation methods. Red solid line — area obtained by computer modelling. Black dotted line — area obtained by geometric method

Сравнение результатов расчета и построения формы площади пожара, полученных различными методами
Comparison of the results of calculation and construction of the shape of the fire area obtained by different methods

Метод* Method*	Площадь пожара (м ²) на момент времени (мин) Fire area (m ²) at the time (min)									
	2	4	6	8	10	12	14	16	18	20
1	2	6	11	18	28	61	107	167	233	316
2	2	6	11	17	26	56	103	172	235	319

* 1 — метод геометрических построений, 2 — метод компьютерного моделирования.

* 1 — method of geometric constructions; 2 — method of computer modelling.

- время расчета 20 мин;
- шаг моделирования 2 мин.

Расчет проводился с помощью Автоматизированной информационно-графической системы Гра-ФиС-Тактик [9], в которой реализован описанный в данной работе алгоритм, а также геометрический метод построения [7] (рис. 16).

Численные значения площади пожара приведены в таблице.

Рассматривая представленные на рис. 16 и в таблице результаты, можно заметить, что в целом отличия между ними незначительны. Разница в полученных значениях площади пожара на момент 20 мин составляет менее 1 %, что в условиях приближенности пожарно-тактических расчетов представляется несущественным.

Вместе с тем можно отметить, что в отдельных случаях контур площади пожара, полученный при помощи метода компьютерного моделирования, опережает контур, полученный при помощи метода геометрических построений. Связано это с тем, что при компьютерном моделировании реализован переход площади пожара к прямоугольной форме при достижении ограждающих конструкций. Как результат, в отдельных случаях мгновенный переход к прямоугольной форме влечет резкое увеличение площади пожара и перемещение вперед фронта пожара. В данном случае такое увеличение произошло в момент времени 14 мин, когда резкий переход к прямоугольной форме пожара привел к тому, что одна из дверей оказалась в зоне горения. В то же время, согласно методу геометрических построений, эта же дверь оказалась в зоне горения только к 16 мин, что и привело к отставанию фронта пожара при переходе в смежное помещение.

В целом, с учетом незначительной разницы в итоговых значениях площади пожара, оба метода могут быть в равной степени использованы при проведении пожарно-тактических расчетов.

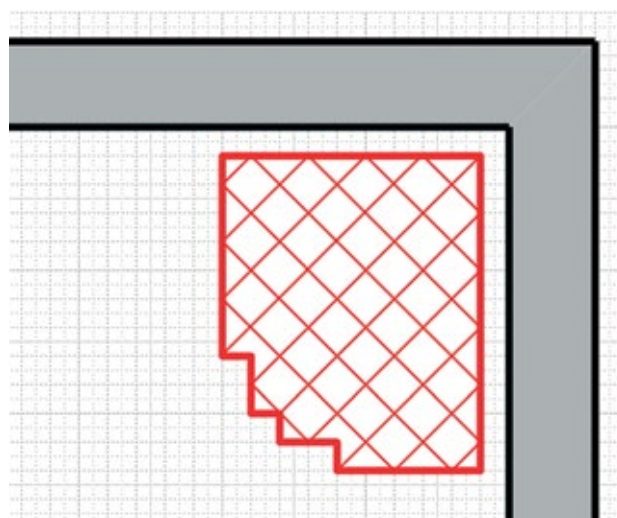


Рис. 17. Возможные неточности формирования итоговой фигуры «Зона горения» — несоответствие контура площади пожара контуру ограждающих конструкций и «зубчатая» структура контура площади пожара

Fig. 17. Possible inaccuracies in the formation of the final figure “Combustion Zone” — discrepancy between the outline of the fire area and the outline of the enclosing structures and the “jagged” structure of the outline of the fire area

Результаты и их обсуждение

Основными достоинствами метода расчета формы площади пожара при помощи компьютерного моделирования являются:

1. Высокая степень соответствия правилам проведения пожарно-тактических расчетов, принятым в Российской Федерации.
2. Наглядность процесса моделирования распространения пожара.
3. Учет влияния на процесс распространения огня приборов подачи ОТВ.
4. Возможность создания на базе реализованной модели, использующей матрицу окружающего пространства, более сложных моделей распространения огня.

В качестве недостатков предложенного алгоритма можно назвать следующие наблюдения.



Рис. 18. Увеличение пути, пройденного огнем в условиях сужающихся стен
Fig. 18. Increasing the fire path in narrowing wall conditions

1. Использование клеточной структуры пространства приводит к тому, что в процессе формирования итоговой фигуры зоны горения могут возникать различные неточности (рис. 17). Так, например, контур итоговой фигуры может неточно совпадать с контуром ограждающих конструкций. Также контур получаемой фигуры имеет характерный «зубчатый» край. Однако этот недостаток наиболее ярко проявляется при значительных размерах зерна.

2. Различные негативные проявления Торцевого эффекта. Эти проявления также могут быть во многом минимизированы за счет уменьшения размера зерна матрицы.

3. Ускорение развития пожара в условиях стен, сужающихся под острым углом (рис. 18).

Этот эффект является следствием перехода к прямоугольным формам от разных стен, что приводит к опережению фронта пожара достраиваемыми при переходе фрагментами фронта.

Заключение

Описанный в работе алгоритм показал высокую гибкость в решении задачи моделирования пожара в соответствии с тактической моделью развития пожара. Полученные формы и размеры площади пожара в полной мере согласуются с правилами рас-

чета, определяемыми тактической моделью, а также не противоречат результатам, получаемым с использованием геометрической модели построения [7].

Алгоритм и его реализация в АИГС ГраФиС-Тактик [9] делают возможным не только учет ограждающих конструкций любой степени сложности, но также и учет в расчете влияния поданных пожарных стволов. Прочих реализаций данной особенности тактической модели неизвестно.

Таким образом, выдвинутая в начале работы гипотеза, что построить форму площади пожара, соответствующую тактической модели и учитывающую время развития пожара и конфигурацию ограждающих конструкций, можно с использованием алгоритма Ли, модифицированного с учетом замечаний, приведенных в работе [22], на основании результатов компьютерного моделирования, может быть принята как подтвержденная.

Направлениями дальнейшего совершенствования данного решения можно назвать:

- разработку кроссплатформенной программной реализации алгоритма;
- совершенствование алгоритма в части повышения быстродействия;
- проведение вычислительных экспериментов по оценке ожидаемых параметров развития пожаров в зданиях различных категорий и назначения.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. *Теребнев В.В.* Пожарно-тактические расчеты. Екатеринбург : ООО «Издательство «Калан», 2017. 104 с.
2. *Anderson J., Sjoström J., Temple A., Charlier M., Dai X., Welch S. et al.* FDS simulations and modelling efforts of travelling fires in a large elongated compartment // 15th International Interflam Conference. London, UK, 2019. Pp. 2085–2094. URL: https://www.researchgate.net/publication/337180149_FDS_simulations_and_modelling_efforts_of_travelling_fires_in_a_large_elongated_compartment
3. *Малютин О.С.* Проблемы использования принятого в пожарной тактике метода построения прогнозируемой площади пожара // Сибирский пожарно-спасательный вестник. 2016. № 1. С. 7–13. URL: <http://vestnik.sibpsa.ru/wp-content/uploads/2016/v1/7-13.pdf>
4. *Матюшин А.В., Порошин А.А., Матюшин Ю.А., Бобринев Е.В., Кондашов А.А.* Проектирование размещения подразделений пожарной охраны в населенных пунктах с использованием геоинформаци-

- онных технологий // *Bezpieczenstwo i Technika Pozarnicza*. 2013. № 3 (31). С. 81–86. DOI: 10.12845/bitp.31.3.2013.9. EDN SBOQIR.
5. *Разливанов И.Н.* Математическое моделирование процессов развития и пожаротушения в условиях ограниченности сил и средств : автореф. дис. ... канд. техн. наук. СПб., 2009. 185 с. URL: https://rusneb.ru/catalog/000199_000009_004256340
 6. *Субачев С.В., Субачева А.А.* Имитационное моделирование развития и тушения пожаров в системе подготовки специалистов противопожарной службы // *Прикладная информатика*. 2008. № 4 (16). С. 27–37. EDN JVIGMN.
 7. *Малютин О.С., Хабибулин Р.Ш.* Алгоритм построения прогнозируемой площади пожара в тактической модели с использованием теории графов // *Проблемы техносферной безопасности : мат. III Междунар. науч.-практ. конф. молодых ученых и специалистов*. М. : Академия ГПС МЧС России, 2014. № 3. С. 67–69. EDN KEQYWC.
 8. *Малютин О.С.* Объектно-информационное моделирование оперативно-тактических действий // *Проблемы техносферной безопасности : мат. IV Междунар. науч.-практ. конф. молодых ученых и специалистов-2015*. М. : Академия ГПС МЧС России, 2015. № 4. С. 466–469. EDN MRPNJA.
 9. *Малютин О.С., Елфимова М.В., Мельник А.А., Батуро А.Н.* Перспективы развития системы ГраФиС как системы поддержки принятия управленческих решений при тушении пожаров // *Вестник Воронежского института ГПС МЧС России*. 2018. № 1 (26). С. 71–78.
 10. *Lee C.Y.* An Algorithm for Path Connections and Its Applications // *IRE Transactions on Electronic Computers*. 1961. No. 3 (10). Pp. 346–365. DOI: 10.1109/TEC.1961.5219222
 11. *Матвеев Ю.Н., Чернышов Л.О.* Модификация алгоритма фронтального моделирования последствий аварийных выбросов на основе эмпирико-статистического подхода // *Программные продукты и системы*. 2024. № 1 (37). С. 95–104. DOI: 10.15827/0236-235X.145.095-104. EDN QTAEND.
 12. *Albini F.A.* A Model for Fire Spread in Wildland Fuels by-Radiation // *Combustion Science and Technology*. 1985. No. 5 (42). Pp. 229–258. DOI: 10.1080/00102208508960381
 13. *Encinas A.H., White S.H., del Rey A.M., Sánchez R.* Modeling forest fire spread using hexagonal cellular automata // *Applied Mathematical Modelling*. 2007. No. 31 (6). Pp. 1213–1227. DOI: 10.1016/j.apm.2006.04.001
 14. *Li F., Zhu Q., Riley W.J., Zhao L., Xu L., Yuan K. et al.* AttentionFire_v1.0: interpretable machine learning fire model for burned area predictions over tropics // *Geoscientific Model Development*. 2023. No. 3 (16). Pp. 869–884. DOI: 10.5194/gmd-2022-195
 15. *Riatma G.P., Yuniarno E.M., Nugroho S.M.S.* Closed Room Fire Propagation Modelling Using Multiple State Variables Cellular Automata // *2018 International Conference on Computer Engineering, Network and Intelligent Multimedia (CENIM)*, Surabaya, Indonesia. 2018. Pp. 204–207. DOI: 10.1109/CENIM.2018.8711360
 16. *Liebert A., Palani A., Rensmeyer T., Breuer M., Niggemann O.* CNN-based Temperature Dynamics Approximation for Burning Rooms // *IFAC-PapersOnLine*. 2004. No. 4 (58). Pp. 420–425. DOI: 10.1016/j.ifacol.2024.07.254
 17. *Govindarajan J., Ward M., Barnett J.* Visualizing simulated room fires, *Proceedings Visualization '99* (Cat. No. 99CB37067). San Francisco, CA, USA, 1999. Pp. 475–565. DOI: 10.1109/VISUAL.1999.809936
 18. *Serón F.J., Gutiérrez D., Magallón J., Ferragut L., Asensio M.I.* The evolution of a WILDLAND forest FIRE FRONT // *The Visual Computer*. 2005. No. 21. Pp. 152–169. DOI: 10.1007/s00371-004-0278-7
 19. *Малютин О.С.* Прогнозирование возможной площади пожара с применением клеточных автоматов // *Сибирский пожарно-спасательный вестник*. 2018. № 2 (9). С. 24–28. EDN XTXQGD.
 20. *Breukelaar R., Bäck Th.* Using a genetic algorithm to evolve behavior in multi dimensional cellular automata: emergence of behavior // *Proceedings of the 7th annual conference on Genetic and evolutionary computation (GECCO05)*. New York, NY, USA : ACM, 2005. Pp. 107–114. DOI: 10.1145/1068009.1068024
 21. *Соколов С.В., Субачев С.В.* Имитационная система моделирования развития и тушения пожара в здании и разработка на ее основе тренажера по организации тушения пожаров // *Проблемы безопасности и чрезвычайных ситуаций*. 2008. № 2. С. 102–106. EDN JTFQEV.

REFERENCES

1. *Terebnev V.V.* *Fire-tactical calculations*. Yekaterinburg, Kalan Publishing House, LLC. 2017; 104. (rus).
2. *Anderson J., Sjoström J., Temple A., Charlier M., Dai X., Welch S. et al.* FDS simulations and modelling efforts of travelling fires in a large elongated compartment. *15th International Interflam Conference*. London, UK, 2019; 2085–2094. URL: https://www.researchgate.net/publication/337180149_FDS_simulations_and_modelling_efforts_of_travelling_fires_in_a_large_elongated_compartment
3. *Malyutin O.S.* Fire square tactical scheme build method usage problems. *Siberian Fire and Rescue Bulletin*. 2016; 1:7–13. URL: <http://vestnik.sibpsa.ru/wp-content/uploads/2016/v1/7-13.pdf> (rus).

4. Matyushin A.V., Poroshin A.A., Matyushin Y.A., Bobrinev E.V., Kondashev A.A. Designing of Fire Service Divisions Location in Settlements Using GIS Technologies. *Bezpieczenstwo i Technika Pozarnicza*. 2013; 3(31):81-86. DOI: 10.12845/bitp.31.3.2013.9. EDN SBOQIR. (rus).
5. Razlivanov I.N. *Mathematical modeling of processes of development and fire extinguishing under conditions of limited forces and resources : abstract of the Dissertation of the candidate of technical sciences*. St. Petersburg, 2009; 185. URL: https://rusneb.ru/catalog/000199_000009_004256340 (rus).
6. Subachev S.V., Subacheva A.A. Simulation modeling of fire development and extinguishing in the system of training fire service specialists. *Applied Computer Science*. 2008; 4(16):27-37. EDN JVIGMN. (rus).
7. Malyutin O.S., Khabibulin R.Sh. Algorithm for constructing a predicted fire area in a tactical model using graph theory. *Problems of technosphere safety : materials of the 3rd international scientific and practical conference of young scientists and specialists*. Moscow, Academy of GPS of the Ministry of Emergency Situations of Russia, 2014; 3:67-69. EDN KEQYWC (rus).
8. Malyutin O.S. Object-informational modeling of actions of fire units. *Problems of technosphere safety : materials of the 4th international scientific and practical conference of young scientists and specialists*. Moscow, Academy of GPS of the Ministry of Emergency Situations of Russia, 2015; 4:466-469. EDN MRPNJA (rus).
9. Malyutin O.S., Elfimova M.V., Melnik A.A., Baturo A.N. Automated informational-graphical system GraFiS as decision support system development perspectives. *Bulletin of the Voronezh Institute of GPS of the Ministry of Emergency Situations of Russia*. 2018; 2(19):71-78. (rus).
10. Lee C.Y. An Algorithm for Path Connections and Its Applications. *IRE Transactions on Electronic Computers*. 1961; 3(10):346-365. DOI: 10.1109/TEC.1961.5219222
11. Matveev Yu.N., Chernyshev L.O. Modifying the algorithm for frontal modeling of accidental release consequences based on the empirical and statistical approach. *Software & Systems*. 2024; 1(37):95-104. DOI: 10.15827/0236-235X.145.095-104. EDN QTAEND. (rus).
12. Albini F.A. A Model for Fire Spread in Wildland Fuels by-Radiation. *Combustion Science and Technology*. 1985; 5(42):229-258. DOI: 10.1080/00102208508960381
13. Encinas A.H., White S.H., del Rey A.M., Sánchez R. Modeling forest fire spread using hexagonal cellular automata. *Applied Mathematical Modelling*. 2007; 31(6):1213-1227. DOI: 10.1016/j.apm.2006.04.001
14. Li F., Zhu Q., Riley W.J., Zhao L., Xu L., Yuan K. et al. AttentionFire_v1.0: interpretable machine learning fire model for burned area predictions over tropics. *Geoscientific Model Development*. 2023; 3(16):869-884. DOI: 10.5194/gmd-2022-195
15. Riatma G.P., Yuniarno E.M., Nugroho S.M.S. Closed Room Fire Propagation Modelling Using Multiple State Variables Cellular Automata. *2018 International Conference on Computer Engineering, Network and Intelligent Multimedia (CENIM)*. Surabaya, Indonesia, 2018; 204-207. DOI: 10.1109/CENIM.2018.8711360
16. Liebert A., Palani A., Rensmeyer T., Breuer M., Niggemann O. CNN-based Temperature Dynamics Approximation for Burning Rooms. *IFAC-PapersOnLine*. 2004; 4(58):420-425. DOI: 10.1016/j.ifacol.2024.07.254
17. Govindarajan J., Ward M., Barnett J. Visualizing simulated room fires. *Proceedings Visualization '99 (Cat. No. 99CB37067)*. San Francisco, CA, USA. 1999; 475-565. DOI: 10.1109/VISUAL.1999.809936
18. Serón F.J., Gutiérrez D., Magallón J, Ferragut L., Asensio M.I. The evolution of a WILDLAND forest FIRE FRONT. *The Visual Computer*. 2005; 21:152-169. DOI: 10.1007/s00371-004-0278-7
19. Malyutin O.S. Forecasting the potential fire area using cellular automata. *Siberian Fire and Rescue Bulletin*. 2018; 2(9):24-28. EDN XTXQGD (rus).
20. Breukelaar R., Bäck Th. Using a genetic algorithm to evolve behavior in multi dimensional cellular automata: emergence of behavior. *Proceedings of the 7th annual conference on Genetic and evolutionary computation (GECCO05)*. New York, NY, USA ACM, 2005; 107-114. DOI: 10.1145/1068009.1068024
21. Sokolov S.V., Subachev S.V. Simulation system for modeling the development and extinguishing of a fire in a building and the development of a simulator for organizing fire extinguishing on its basis. *Problems of safety and emergency situations*. 2008; 2:102-106. EDN JTFQEV. (rus).

Поступила 21.01.2025, после доработки 12.05.2025;

принята к публикации 14.05.2025

Received January 21, 2025; Received in revised form May 12, 2025;

Accepted May 14, 2025

Информация об авторах

МАЛЮТИН Олег Сергеевич, подполковник внутренней службы, начальник отдела информационных технологий и компьютерного моделирования научно-технического центра,

Information about the authors

Oleg S. MALYUTIN, Lieutenant Colonel of the Internal Service, Head of the Informational Technologies and Computer Modelling Unit, ScienceTechnical Center, Siberian Fire and Rescue Aca-

Сибирская пожарно-спасательная академия Государственной противопожарной службы Министерства Российской Федерации по делам гражданской обороны, чрезвычайным ситуациям и ликвидации последствий стихийных бедствий; Россия, 662972, Красноярский край, г. Железнодорожск, ул. Северная, 1; ORCID: 0000-0001-5543-1324; e-mail: itikm.sibpsa@yandex.ru

ШМЫРЕВА Марианна Борисовна, подполковник внутренней службы, к.э.н., заместитель начальника научно-технического центра, Сибирская пожарно-спасательная академия Государственной противопожарной службы Министерства Российской Федерации по делам гражданской обороны, чрезвычайным ситуациям и ликвидации последствий стихийных бедствий; Россия, 662972, Красноярский край, г. Железнодорожск, ул. Северная, 1; ORCID: 0000-0002-5485-324X; e-mail: ntc@sibpsa.ru

БАБЕНЫШЕВ Сергей Валерьевич, канд. физ.-матем. наук, профессор кафедры физики, математики и информационных технологий, Сибирская пожарно-спасательная академия Государственной противопожарной службы Министерства Российской Федерации по делам гражданской обороны, чрезвычайным ситуациям и ликвидации последствий стихийных бедствий; Россия, 662972, Красноярский край, г. Железнодорожск, ул. Северная, 1; ORCID: 0000-0002-1784-0837; e-mail: sergei.babyonyshev@mail

Вклад авторов:

Малютин О.С. — проведение исследования; написание исходного текста; итоговые выводы.

Шмырева М.Б. — введение; обзор существующих решений; актуальность.

Бабенышев С.В. — визуализация представленных материалов; обоснование алгоритма.

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

demy of the Ministry of Russian Federation for Civil Defense, Emergencies and Elimination on Consequences of Natural Disasters, Severnaya St., 1, Krasnoyarskiy Kray, Zheleznogorsk, 662972, Russian Federation; ORCID:0000-0001-5543-1324; e-mail: itikm.sibpsa@yandex.ru

Marianna B. SHMYREVA, Lieutenant Colonel of the Internal Service, Cand. Sci. (Economics), Deputy Head of the Scientific and Technical Center, Siberian Fire and Rescue Academy of the Ministry of Russian Federation for Civil Defense, Emergencies and Elimination on Consequences of Natural Disasters, Severnaya St., 1, Krasnoyarskiy Kray, Zheleznogorsk, 662972, Russian Federation; ORCID: 0000-0002-5485-324X; e-mail: ntc@sibpsa.ru

Sergey V. BABENYSHEV, Cand. Sci. (Physics and Mathematics), Professor of the Department of Physics, Mathematics and Information Technology, Siberian Fire and Rescue Academy of the Ministry of Russian Federation for Civil Defense, Emergencies and Elimination on Consequences of Natural Disasters, Severnaya St., 1, Krasnoyarskiy Kray, Zheleznogorsk, 662972, Russian Federation; ORCID: 0000-0002-1784-0837; e-mail: sergei.babyonyshev@mail.ru

Contribution of the authors:

Malyutin O.S. — conducting research; writing the main text; writing the draft; final conclusions.

Shmyreva M.B. — introduction; overview of existing solutions; relevance.

Babenyshev S.V. — visualization of the presented materials; justification of the algorithm.

The authors declare that there is no conflict of interest.

Исследование пожарной опасности текстильных материалов и изделий мягкой мебели для внутренней отделки пассажирских вагонов

Наталия Ивановна Константинова¹, Андрей Владимирович Зубань^{1✉},
Сергей Викторович Пузач²

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. Вопросы обеспечения пожарной безопасности перевозки пассажиров являются важными, в связи с этим изучение уровня пожарной нагрузки пассажирского салона железнодорожного транспорта и получение актуальных данных для моделирования развития пожара представляются актуальной задачей. Существующая система требований пожарной безопасности, предъявляемых к материалам внутренней отделки салонов пассажирских вагонов, в том числе к текстильным и изделиям мягкой мебели, требует существенного уточнения. Цель настоящих исследований заключается в изучении параметров пожарной опасности текстильных материалов и изделий мягкой мебели салонов пассажирских вагонов, разработке предложений по уточнению нормативных требований, регламентирующих их пожарную безопасность, и получению новых данных пожарной нагрузки при моделировании развития пожара.

Методы исследований. Использовались стандартные методы определения воспламеняемости декоративных тканей (ГОСТ Р 50810–95), показателя токсичности продуктов горения и дымообразующей способности (ГОСТ 12.1.044.18), методика оценки пожарной опасности конструкций диванов вагонов метрополитена (НПБ 109) и метод оценки концентраций токсичных газов на маломасштабной экспериментальной установке для определения пожарной опасности конденсированных веществ и материалов.

Результаты исследований и их обсуждение. Проанализированы требования пожарной безопасности, предъявляемые к текстильным материалам и мягким изделиям внутренней отделки пассажирских вагонов. Получены экспериментальные данные оценки параметров пожарной опасности штор, обивочных материалов и мягких элементов мебели салонов пассажирских вагонов. Выявлена опасность высокотоксичных газов, выделяющихся при термическом разложении материалов мягкой мебели, для жизни и здоровья пассажиров и необходимость учета значений их концентраций при моделировании развития пожара.

Выводы. Разработаны предложения по уточнению нормативных требований пожарной безопасности текстильных материалов и изделий мягкой мебели салонов пассажирских вагонов. Представлены результаты исследований характеристик пожарной опасности материалов сидений, кресел, спальняных полоков, которые следует учитывать для исключения использования наиболее опасных из них в салонах вагонов.

Ключевые слова: пожарная нагрузка; воспламеняемость; удельная массовая скорость выгорания; токсичность продуктов термического разложения

Для цитирования: Константинова Н.И., Зубань А.В., Пузач С.В. Исследование пожарной опасности текстильных материалов и изделий мягкой мебели для внутренней отделки пассажирских вагонов // Пожаровзрывобезопасность/Fire and Explosion Safety. 2025. Т. 34. № 3. С. 22–33. DOI: 10.22227/0869-7493.2025.34.03.22-33

✉ Зубань Андрей Владимирович, e-mail: avzuban@mail.ru

Investigation of the fire hazard of textile materials and soft furniture products for interior decoration of passenger wagons

Nataliya I. Konstantinova¹, Andrej V. Zuban^{1✉}, Sergej V. Puzach²

¹ All-Russian Research Institute for Fire Protection of Ministry of Russian Federation for Civil Defence, Emergencies and Elimination of Consequences of Natural Disasters, Balashikha, Moscow Region, Russian Federation

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

ABSTRACT

Introduction. The issues of ensuring the fire safety of passenger transportation are important, in this regard, studying the level of fire load in the passenger compartment of railway transport and obtaining up-to-date data for modelling the development of fire is an urgent task. The existing regulatory system of fire safety requirements for interior decoration materials for passenger wagons, including textiles and upholstered furniture, requires significant clarification.

The purpose of these studies is to study the fire hazard parameters of textile materials and upholstered furniture products of salons passenger wagons, to develop proposals for clarifying regulatory requirements governing their fire safety and to obtain new fire load data when modelling fire development.

Research methods. Standard methods were used to determine the flammability of decorative fabrics (GOST R 50810–95), the toxicity indicator of combustion products and smoke-forming capacity (GOST 12.1.044.18), the methodology for assessing the fire hazard of subway car sofas (NPB 109) and the method for assessing the concentration of toxic gases on a small-scale experimental installation to determine the fire hazard of condensed substances and materials.

Research results and their discussion. Regulatory fire safety requirements for textile materials and soft products of interior decoration of passenger wagons were analyzed. Experimental data of estimation of fire hazard parameters of curtains, upholstery materials and upholstered furniture elements of passenger car saloons are obtained. The danger of highly toxic gases emitted during thermal decomposition of upholstered furniture materials for the life and health of passengers and the need to take into account the values of their concentrations when modelling the development of a fire were revealed.

Conclusions. Proposals are developed to clarify the normative requirements for fire safety of textile materials and upholstered furniture products of passenger wagons saloons. There are presented the results of research of fire hazard characteristics of materials of seats, armchairs, sleeping shelves, which should be taken into account to exclude the use of the most dangerous ones in the saloons of wagons.

Keywords: fire load; flammability; specific mass burn up rate; toxicity of thermal decomposition products

For citation: Konstantinova N.I., Zuban A.V., Puzach S.V. Investigation of the fire hazard of textile materials and soft furniture products for interior decoration of passenger wagons. *Pozharovzryvbezopasnost/Fire and Explosion Safety*. 2025; 34(3):22-33. DOI: 10.22227/0869-7493.2025.34.03.22-33 (rus).

✉ Andrej Vladimirovich Zuban', e-mail: avzuban@mail.ru

Введение

Обеспечение безопасности систем общественного транспорта остается важной актуальной проблемой во всем мире и включает в себя соблюдение требований соответствующих нормативных документов. Среди объектов транспортной структуры выделяются железные дороги и метрополитены своей протяженностью, высокой плотностью пассажирских перевозок и значительным ростом их развития.

Метрополитены расширяются одновременно с освоением новых городских территорий и приростом населения. Увеличение эксплуатационной длины железных дорог, в том числе, связано с необходимостью укрепления экономического суверенитета и снижения совокупных транспортных издержек экономики¹. При этом вопросы обеспечения пожарной безопасности перевозки пассажиров являются ключевыми в рамках общей системы «транспортная безопасность».

Внимание многих специалистов уделяется анализу причин пожаров, формулированию целей и задач системы управления пожарной безопасностью на железнодорожном транспорте, а также комплексным мерам по обеспечению безопасной перевозки пассажиров [1].

В частности, комплексные меры по обеспечению безопасности перевозки пассажиров включают в себя мероприятия по пассивной и активной защите транспортных средств (вагонов).

Пожарная опасность вагонов связана с величиной уровня пожарной нагрузки пассажирского салона, которая в некоторых случаях достигает 90 % и состоит, в том числе, из отделочных, облицовочных, теплоизоляционных материалов, а также текстильных изделий.

Проведя анализ пожаров в пассажирских вагонах железнодорожного транспорта, можно выделить специфические особенности распространения опасных факторов пожара (ОФП) [2]:

- во-первых, пожар быстро распространяется по внутренней отделке, вентиляционным системам вагона и электрооборудованию, охватывая один вагон за другим. Скорость развития пожара в коридоре достигает 5 м/мин, в купе — 2,5 м/мин;
- во-вторых, угроза пассажирам может исходить из того, что в силу своих конструктивных особенностей в течение 7–10 мин вагон выгорает полностью. Стоит отметить, что температура в горящем вагоне составляет порядка 900–1000 °С;
- в-третьих, концентрация токсичных продуктов горения быстро возрастает, а пути эвакуации блокируются дымом.

По проведенным обзорам пожаров в пассажирских составах наиболее частыми причинами

¹ Транспортная стратегия Российской Федерации до 2030 года с прогнозом на период до 2035 года : утв. распоряжением правительства Российской Федерации от 27 ноября 2021 г. № 3363-р.

являются нарушения правил эксплуатации электрооборудования, техническая неисправность оборудования, неосторожное обращение с огнем [3].

Существующие требования нормативных документов, регламентирующие пожарную безопасность материалов внутренней отделки салонов вагонов, ограничивают применение горючих материалов по уровням показателя токсичности продуктов горения (HCL_{50}), индекса распространения пламени по поверхности (ИПП) и коэффициента дымообразования (Д). Однако методы и критерии оценки параметров пожарной опасности в ряде случаев носят несогласованный характер и требуют существенного уточнения.

Обеспечение пожарной безопасности железнодорожных пассажирских вагонов также затрагивает вопросы прогнозирования развития пожара, моделируются показатели динамики распространения опасных факторов пожара, определяемые для расчета необходимого времени эвакуации людей из вагонов до момента блокирования эвакуационных путей [4, 5]. Исследователями проводится анализ рисков, связанных с возникновением пожаров и эвакуацией людей в железнодорожной транспортной сети [6–8].

Наиболее пожароопасными материалами внутренней отделки вагонов являются текстильные материалы и изделия из них, поэтому проводятся мероприятия по их огнезащите.

Таким образом, вопросы, связанные с исследованием параметров пожарной опасности материалов внутренней отделки салонов вагонов и получением объективных данных для расчета пожарной нагрузки, в том числе штор, портьер, кресел, диванов, спальных полок, занимающих в их пространстве достаточно большой объем, остаются весьма актуальными.

Цель настоящих исследований заключается в изучении параметров пожарной опасности текстильных материалов и изделий мягкой мебели салона вагонов, влияющих на уровень ОФП, и разработке предложений по уточнению нормативных требований, регламентирующих их пожарную безопасность, и данных пожарной нагрузки при моделировании развития пожара.

Для достижения поставленной цели необходимо было решить следующие задачи:

- провести анализ основных нормативных документов по требованиям и методам испытаний пожарной опасности материалов внутренней отделки для вагонов железных дорог и метрополитена в Российской Федерации и за рубежом;
- получить сравнительные экспериментальные данные по оценке комплекса параметров пожар-

ной опасности штор, обивочных материалов и мягких элементов мебели салонов пассажирских вагонов;

- разработать предложения по уточнению нормативных требований, регламентирующих пожарную безопасность текстильных материалов и мягких элементов мебели для пассажирских вагонов.

Методы исследований

Для определения показателей пожарной опасности штор и мягких элементов мебели использовалось следующее экспериментальное оборудование:

- стандартный прибор для определения воспламеняемости тканей по ГОСТ Р 50810–95²;
- стандартная установка для экспериментального определения показателя токсичности продуктов горения твердых веществ и материалов по ГОСТ 12.1.044–2018 (раздел 13)³;
- стандартная установка для экспериментального определения коэффициента дымообразования твердых веществ и материалов по ГОСТ 12.1.044–2018 (раздел 11)³;
- стенд и оборудование для испытаний по методике А — оценки пожарной опасности конструкций диванов вагонов метрополитена согласно Приложению 2⁴;
- установка для определения пожарной опасности конденсированных веществ и материалов⁵.

Результаты исследований и их обсуждение

В табл. 1 представлена информация о требованиях пожарной безопасности к материалам штор и мягких изделий внутренней отделки пассажирских вагонов, изложенная в основных действующих Российских и межгосударственных нормативных документах.

Как следует из данных табл. 1, в основных действующих нормативных документах отсутствуют единые требования по параметрам и критериям оценки, а также методологии проведения испытаний на пожарную опасность материалов штор, диванов, кресел, спальных полок пассажирских вагонов.

² ГОСТ Р 50810–95. Пожарная безопасность текстильных материалов. Ткани декоративные. Метод испытания на воспламеняемость и классификация.

³ ГОСТ 12.1.044–2018. Система стандартов безопасности труда (ССБТ). Пожаровзрывоопасность веществ и материалов. Номенклатура показателей и методы их определения.

⁴ НПБ 109. Вагоны метрополитена. Требования пожарной безопасности.

⁵ Патент РФ на полезную модель № 174688. Установка для определения пожарной опасности конденсированных материалов при их термическом разложении / Сулейкин Е.В., Акперов Р.Г., Пузач С.В.; заяв. 20.04.2017; рег. 26.10.2017. Бюл. № 30–2017.

Таблица 1. Основные нормативные требования пожарной безопасности, предъявляемые к текстильным материалам и мягким изделиям внутренней отделки пассажирских вагонов

Table 1. Basic regulatory fire safety requirements shown for textile materials and soft furniture products of interior finishing of passenger wagons

Нормативный документ Regulatory document	Требование Requirement	Нормативный документ, содержащий методы испытаний A regulatory document containing test methods
ГОСТ 34013–2016. Кресло пассажирское моторвагонного подвижного состава и пассажирских вагонов локомотивной тяги. Общие технические условия GOST 34013–2016. Passenger seat of railcar rolling stock and passenger cars with locomotive traction. General specifications	<p>Все используемые в конструкции и отделке кресла не-металлические материалы и материалы съемных чехлов (при их наличии) должны соответствовать требованиям пожаровзрывобезопасности по ГОСТ 12.1.044³, иметь показатель токсичности продуктов горения более 40 г/м³ (при времени экспозиции 30 мин). Показатели пожарной безопасности пассажирских кресел должны удовлетворять следующим требованиям:</p> <ul style="list-style-type: none"> • время самостоятельного горения — не более 10 мин; • отсутствие падения капель горящего расплава <p>All non-metallic materials and removable covers used in the construction and decoration of the chair (if any) must comply with the fire and explosion safety requirements according to GOST 12.1.044³ and have a toxicity indicator of combustion products exceeding 40 g/m³ (with an exposure time of 30 minutes). The fire safety indicators of passenger chairs must meet the following requirements:</p> <ul style="list-style-type: none"> • time of independent combustion — no more than 10 min; • absence of drops of burning melt falling 	ГОСТ 12.1.044 ³ . ГОСТ 34013 (Приложение Л) GOST 12.1.044 ³ . GOST 34013 (Application L)
ГОСТ 34394–2018. Локомотивы и моторвагонный подвижной состав. Требования пожарной безопасности GOST 34394–2018. Locomotive and motor rolling stock. Requirements of fire safety	<p>Каркас сидений ТПС, включая кресло машиниста, должен быть из материалов группы НГ по ГОСТ 12.1.044³, обивка сидений ТПС, включая кресло машиниста, должна быть из трудновоспламеняемых материалов, слабо распространяющих пламя, в соответствии с требованиями национальных нормативных документов</p> <p>The frame of the TPS seats, including the driver's seat, must be made of materials from the NG group according to GOST 12.1.044³, TPS seat upholstery, including the driver's seat, should be made of hardly flammable materials that weakly spread the flame, in accordance with the requirements of national regulatory documents</p>	ГОСТ 12.1.044 ³ . ГОСТ Р 51032–97. Материалы строительные метод испытания на распространение пламени GOST 12.1.044 ³ . GOST R 51032–97. Materials of construction flame spread test method
ГОСТ Р 55183–2012. Вагоны пассажирские локомотивной тяги. Требования пожарной безопасности GOST R 55183–2012. Passenger cars on locomotive traction. Fire safety requirements	<p>Для занавесей, штор, обивки спальных полок, диванов и кресел. Показатели пожарной опасности материала:</p> <ul style="list-style-type: none"> • трудновоспламеняемый (для плавящихся материалов характеризуется параметром воспламеняемости и определяется по ГОСТ Р 50810², для неплавящихся тканей характеризуется индексом распространения пламени); • ИРП ≤ 20; • D ≤ 1500 м²/кг; • HCL₅₀ ≥ 40 г/м³ <p>For curtains, upholstery of sleeping shelves, sofas and arm-chairs. Fire hazard indicators of the material:</p> <ul style="list-style-type: none"> • Hardly flammable (for melting materials it is characterized by the flammability parameter and is determined according to GOST R 50810², for non-melting fabrics is characterized by a flame propagation index); • IRP ≤ 20; • D ≤ 1,500 m²/kg; • HCL₅₀ ≥ 40 g/m³ 	ГОСТ 12.1.044 ³ . ГОСТ Р 50810 ² . GOST 12.1.044 ³ . GOST R 50810 ²

Нормативный документ Regulatory document	Требование Requirement	Нормативный документ, содержащий методы испытаний A regulatory document containing test methods
ГОСТ 34805–2021. Вагоны пассажирские локомотивной тяги Требования пожарной безопасности. Методы испытаний по оценке пожароопас- ных свойств неметал- лических материалов GOST 34805–2021. Passenger cars on locomotive traction. Fire safety requirements. Test methods for evaluation of fire- hazardous properties of non-metallic materials	<p>Для занавесей, штор, обивки спальных полок, диванов и кресел.</p> <p>Показатели пожарной опасности материала:</p> <ul style="list-style-type: none"> • трудновоспламеняемый; • $ИРП \leq 20$; • $D \leq 1200 \text{ м}^2/\text{кг}$; • $HCL_{50} \geq 40 \text{ г/м}^3$ (при экспозиции 30 мин). <p>Оценка пожарной опасности спальных полок пассажирских вагонов определяется в соответствии с методом, изложенным в приложении В, кресел — по ГОСТ 34013</p> <p>For curtains, upholstery of sleeping shelves, sofas and armchairs.</p> <p>Fire hazard indicators of the material:</p> <ul style="list-style-type: none"> • Hardly flammable; • $IRP \leq 20$; • $D \leq 1,200 \text{ м}^2/\text{кг}$; • $HCL_{50} \geq 40 \text{ г/м}^3$ (with an exposure time of 30 minutes). <p>The fire hazard assessment of the sleeping shelves of passenger cars is determined in accordance with the method set out in Application V, the seats — according to GOST 34013</p>	<p>ГОСТ Р 50810². ГОСТ 12.1.044³. ГОСТ 34805 (Приложение В). ГОСТ 34013.</p> <p>Индекс распространения пламени по поверхности материалов для тканей допускается определять в соответствии с методом, изложенным в приложении А. Индекс распространения пламени по поверхности материалов для напольных покрытий, в том числе ковровых, допускается определять в соответствии с методом, изложенным в приложении Б</p> <p>GOST R 50810². GOST 12.1.044³. GOST 34805 (Application V). GOST 34013.</p> <p>The flame propagation index over the surface of fabric materials may be determined in accordance with the method described in application A. The flame propagation index on the surface of flooring materials, including carpets, may be determined in accordance with the method described in application B</p>
НПБ–109 ⁴ NPB–109 ⁴	<p>Облицовка стен, покрытия полов, обивки сидений и спинок диванов должны быть выполнены из материалов, не распространяющих или медленно распространяющих пламя. При этом их показатели токсичности не должны быть менее 40 г/м^3, а коэффициент дымообразования не более $1000 \text{ м}^2/\text{кг}$. Конструкция диванов не должна распространять горение при испытаниях по методике, приведенной в Приложении 2 настоящих норм</p> <p>Wall cladding, floor covering, seat upholstery and sofa backs shall be made of materials that do not spread or slowly spread flame. At the same time, their toxicity indicators should not be less than 40 г/м^3, and the smoke generation coefficient is not more than $1,000 \text{ м}^2/\text{кг}$.</p> <p>The design of sofas should not spread combustion during tests according to the method given in Application 2 of this standard</p>	<p>ГОСТ 12.1.044³. НПБ–109⁴ (Приложение 2) GOST 12.1.044³. NPB–109⁴ (Application 2)</p>

Указанное обстоятельство вызывает не только затруднения при разработке указанных изделий и проведении работ по подтверждению соответствия требованиям пожарной безопасности, но и получе-

нию данных по пожарной нагрузке, используемых в качестве исходных величин для расчета динамики опасных факторов пожара. В частности, классификация обивочного материала по распространению

пламени — «слабораспространяющий» (ГОСТ 34394–2018⁶) проводится по результатам испытаний согласно методу ГОСТ Р 51032⁷, предназначенному для горючих строительных материалов (материалы поверхностных слоев конструкций полов и кровель). Также непонятна причина отсутствия ограничения у набивочных материалов по показателю токсичности продуктов горения и дымообразующей способности, учитывая, что в креслах, диванах и спальнях полках в том числе используется вспененный эластичный полиуретан (ЭППУ), ряд рецептур которого относится к материалам повышенной пожарной опасности. Остается не ясным вопрос о причине, по которой различаются между собой нормативные значения коэффициента дымообразования обивочных материалов одних и тех же изделий мягкой мебели в пассажирских вагонах. Кроме того, предлагаемая оценка «плавающих» и «неплавающих» обивочных материалов различными методами по назначению, условиям проведения испытаний, определяемым параметрам и критериям не дает объективного определения их горючести.

Не обосновано, почему для материалов стен и потолка ИРП оценивается по ГОСТ 12.1.044³ (раздел 9) — при максимальном значении плотности теплового потока $32,0 \pm 3,0$ кВт/м². Для тканей ИРП, согласно ГОСТ 34805⁸ (приложение А), оценивается при максимальном значении плотности теплового потока $27,5 \pm 5,7$ кВт/м², а для напольных покрытий ИРП, согласно ГОСТ 34805⁸ (приложение Б), оценивается при максимальном значении плотности теплового потока $13,5 \pm 5,7$ кВт/м². Указанные методы испытаний различаются численными значениями плотности падающего на образец теплового потока, его ориентацией относительно теплового источника, но при этом установлена одинаковая классификация материалов по ИРП.

В европейской нормативной практике материалы, используемые в железнодорожном транспорте, должны соответствовать стандарту EN 45545-2⁹ для обеспечения максимального уровня безопасной эвакуации людей в случае пожара. По международным стандартам материалы разделяют по степени пожарной опасности в зависимости от классификации железнодорожного транспорта, учитывающей многообразие факторов: конструкцию вагона, усло-

вия эксплуатации, протяженность пути в тоннелях, является ли он автоматическим, двухэтажным или со спальным местом на борту и др. Нормативные параметры пожарной безопасности материалов устанавливаются по распространению пламени, воспламеняемости, дымообразующей способности и токсичности продуктов горения. При этом для оценки токсичности продуктов горения применяется обобщенный интегральный показатель, характеризующий токсикологическое действие продуктов термического разложения и процесса горения, в том числе материалов кресел, для чего используется метод (ISO 5659-2¹⁰), основанный на исследовании результатов количественного анализа достаточно широкого спектра газов.

Учитывая, что в случае возникновения пожара в салоне вагона при горении мягких элементов могут образовываться токсичные химические соединения, количественный и качественный состав которых зависит от материалов, участвующих в процессе газификации, следует оценивать их уровень для решения комплекса вопросов безопасной эвакуации пассажиров.

Для обивки мягкой мебели вагонов в основном применяются ткани из огнезащищенных полиэфирных волокон и рулонные материалы на основе поливинилхлорида (ПВХ) — винилискожа.

Известно, что наиболее эффективными замедлителями горения при химическом модифицировании полиэфирных волокон являются фосфорорганические функциональные соединения, которые снижают процесс термоокислительной деструкции как в газовой, так и в конденсированной фазах [9–11]. Огнезащищенные таким способом ткани из ПЭ волокон находят широкое использование за рубежом, в том числе в качестве обивки мягкой мебели для транспортных средств [12].

Развитие различных технологий изготовления материалов из винилискожи пониженной пожарной опасности позволило применять указанный материал для обивки полок и сидений пассажирских железнодорожных вагонов и вагонов метро. Практический опыт показал некоторые преимущества использования данного материала по сравнению с применяемыми на транспорте тканями для обивки кресел по таким эксплуатационным характеристикам, как прочность, износостойчивость, влагостойкость, антивандальные свойства и др.

Решение вопросов эффективной огнезащиты ПВХ-материалов сводится к выбору комплексных огнезамедлительных систем, повышающих термостойкость и снижающих окисление, а вместе с тем

⁶ ГОСТ 34394–2018. Локомотивы и моторвагонный подвижной состав. Требования пожарной безопасности.

⁷ ГОСТ Р 51032–97. Материалы строительные. Метод испытания на распространение пламени.

⁸ ГОСТ 34805–2021. Вагоны пассажирские локомотивной тяги. Требования пожарной безопасности. Методы испытаний по оценке пожароопасных свойств неметаллических материалов.

⁹ EN 45545-2. Пожарная безопасность железнодорожного транспорта.

¹⁰ ISO 5659-2:2017. Plastics — Smoke generation. Part 2: Determination of optical density by a single-chamber test.

дымообразование и токсичность продуктов горения [13–15].

Проводимые исследования в данной области направлены на повышение совместимости ОЗ с матрицей ПВХ и оптимизации технологического процесса изготовления для снижения их горючести [16–18].

В настоящей работе были проведены сравнительные экспериментальные исследования по оценке комплекса показателей пожарной опасности как материалов, так и макетов пассажирских сидений (кресел). В качестве образцов штор и обивочных материалов для испытаний были выбраны наиболее применяемые — ткани из 100 % огнезащищенных полиэфирных волокон, винилискожа пониженной пожарной опасности (винилискожа ТВ), прокладочный материал из термостойких волокон (ТМ), а также наполнители — ЭППУ системы. Диапазон значений основных показателей пожарной опасности исследованных материалов представлен в табл. 2.

Как следует из данных таблицы, исследованные образцы материалов по показателю токсичности могут относиться к различным группам опасности

(Т2, Т3 или Т4). При этом максимальные уровни выхода СО и СО₂ зафиксированы у образцов наполнителя из ППУ, материалов из термостойких волокон, а также композиций ткани из 100 % ПЭ огнезащищенных волокон и винилискожи (ТВ) с наполнителем из ЭППУ. Это обстоятельство свидетельствует, что в случае теплового воздействия на мягкие элементы внутреннего обустройства вагонов, даже в случае использования обивочного материала пониженной пожарной опасности при термическом разложении такого сочетания материалов, количественный выход основных токсикантов СО и СО₂ будет сопоставим с их численными значениями ЭППУ, опасными для токсикологической среды.

Результаты экспериментальной оценки сопротивляться возгоранию образца дивана вагона при воздействии теплового импульса нормированной мощности («подушки» из газетной бумаги, расположенной на поверхности сиденья), согласно методике приложения 2 НПБ-109⁴, показали следующее.

Образец кресла (размерами: сиденья 495 × 420 мм, спинки 495 × 420 мм), представляющий компози-

Таблица 2. Результаты исследований свойств пожарной опасности материалов для пассажирских кресел вагонов метро и железной дороги

Table 2. Results of studies of fire hazard properties of materials for passenger chairs of metro and railway cars

Обивочный материал, состав, поверхностная/объемная плотность (p) Upholstery material, composition, surface/volume density (p)	ГОСТ 12.1.044 ³ GOST 12.1.044 ³			
	Параметры токсичности продуктов горения Combustion products toxicity parameters			Коэффициент дымообразования $D_{ср}$, м ² /кг Smoke generation coefficient D_{av} , m ² /kg
	Выход СО, мг/г Output CO, mg/g	Выход СО ₂ , мг/г Output CO ₂ , mg/g	Показатель токсичности, HCL ₅₀ Toxicity indicator HCL ₅₀	
Ткани (ТВ) 100 % мод. ПЭ, $p = 330\text{--}600$ г/см ² Fabric (FR) 100 % mod. PE, $p = 330\text{--}600$ g/sm ²	145–165	1220–1240	27–40	900–1250
Винилискожа (ТВ), $p = 520\text{--}750$ г/см ² Vinyl artificial leather (FR), $p = 520\text{--}750$ g/sm ²	–	–	45–52	1100–1420
ППУ, $p = 35\text{--}50$ г/см ³ PPU, $p = 35\text{--}50$ g/sm ³	174–214	1054–1350	13–23	750–1050
Ткань 100 % мод. ПЭ ($p = 600$ г/см ²) + ЭППУ ($p = 35$ г/см ³) Fabric 100 % mod. PE ($p = 600$ g/sm ²) + EPPU ($p = 35$ g/sm ³)	170	1245	–	–
Винилискожа (ТВ), ($p = 750 \pm 75$ г/см ²) + ЭППУ ($p = 35$ г/см ³) Vinyl artificial leather (FR), ($p = 750 \pm 75$ g/sm ²) + EPPU ($p = 35$ g/sm ³)	180	1320	–	–
Материал на основе термостойких волокон, $p = 180$ г/см ² Fabric based on heat resistant fibres, $p = 180$ g/sm ²	175	1028	17	–

цию из «Винилискожи-Т», толщиной 0,5 мм слоем ЭППУ «Молитан» 15 мм и трудногорючей фанеры «ФСМ-ТМ» толщиной 6 мм с каркасом из стеклопластика на основе ПЭ трудногорючей смолы «F 805 TF» выдержал испытания согласно НПБ-109⁴ (Приложение 2) на способность сопротивляться возгоранию при воздействии теплового импульса нормированной мощности. Однако основные зафиксированные через каждые 30 с опыта наблюдения за процессом горения, а именно: горение обивки сиденья под источником зажигания (90 с), пробежка пламени по обивке спинки, горение обивки сиденья и ЭППУ (120 с), горение ЭППУ, обивки сиденья и спинки (180 с), прогорание ЭППУ и обивки сиденья в зоне расположения источника зажигания, обильное дымовыделение (210 с), очаги горения фанеры, обильное дымовыделение (270 с) — свидетельствуют о наличии в течение воздействия теплового источника (320 с) процесса горения композиции кресла, а значит выделения опасных газобразных токсичных продуктов.

Полученные результаты коррелируют с проведенными авторами экспериментальными исследованиями на установке для определения пожарной

опасности конденсированных материалов при их термическом разложении, позволившими получить данные по удельной массовой скорости выгорания и численным значениям удельных коэффициентов образования монооксида углерода (CO) и циановодорода (HCN) для элементов кресел (обивочная трудновоспламеняемая винилискожа, термостойкая ткань (ТМ) — в качестве прокладки и ЭППУ в качестве набивочного материала), токсикологическое воздействие которых опасно для организма человека.

Образцы элементов кресел (винилискожа ТВ + ТМ + ЭППУ) размерами 10 × 10 см исследовались на экспериментальной установке в двух режимах терморазложения с плотностями падающих на поверхность образцов теплового потока $q = 15 \text{ кВт/м}^2$ и $q = 35 \text{ кВт/м}^2$.

Зависимости от времени с начала проведения эксперимента парциальных плотностей и удельных коэффициентов образования основных токсикантов (монооксида углерода и циановодорода) образцов композиции сиденья представлены на рис. 1–4.

Графические зависимости, представленные на рис. 1–4, свидетельствуют, что значения парциальной плотности монооксида углерода композиции

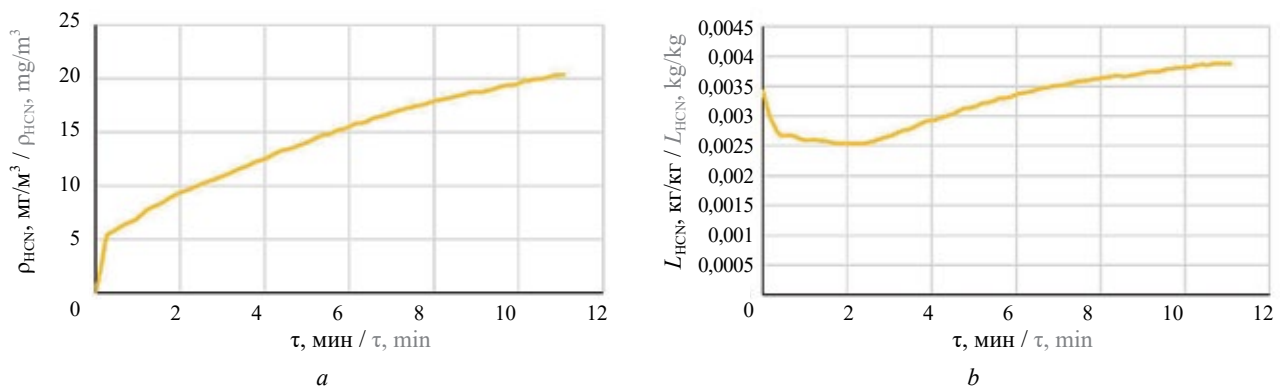


Рис. 1. Зависимости от времени парциальной плотности (a) и удельного коэффициента образования циановодорода (b) при $q = 35 \text{ кВт/м}^2$

Fig. 1. Time dependence of partial density (a) and specific coefficient of hydrogen cyanide formation (b) at $q = 35 \text{ kW/m}^2$

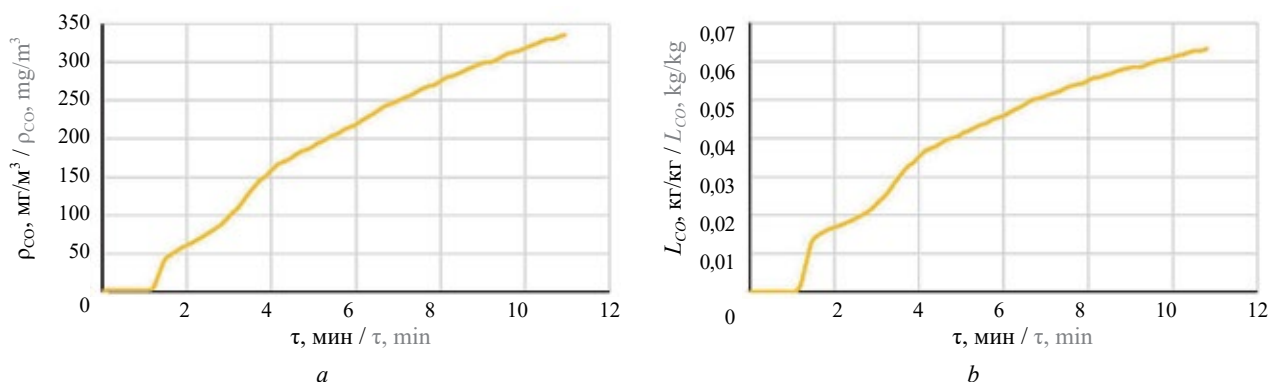


Рис. 2. Зависимости от времени парциальной плотности (a) и удельного коэффициента образования монооксида углерода (b) при $q = 35 \text{ кВт/м}^2$

Fig. 2. Time dependence of partial density (a) and specific coefficient of carbon monoxide formation (b) at $q = 35 \text{ kW/m}^2$

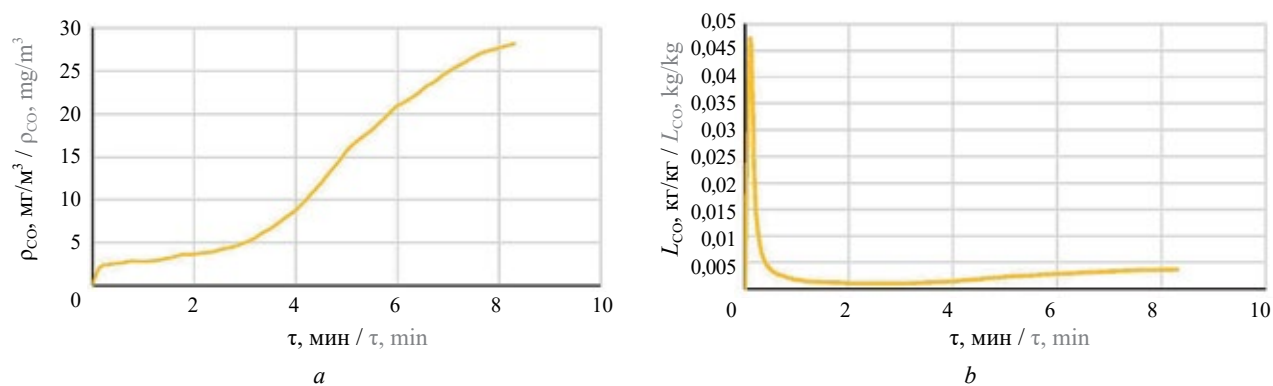


Рис. 3. Зависимости от времени парциальной плотности (а) и удельного коэффициента образования циановодорода (b) при $q = 15 \text{ кВт/м}^2$

Fig. 3. Time dependence of partial density (a) and specific coefficient of hydrogen cyanide formation (b) at $q = 15 \text{ kW/m}^2$

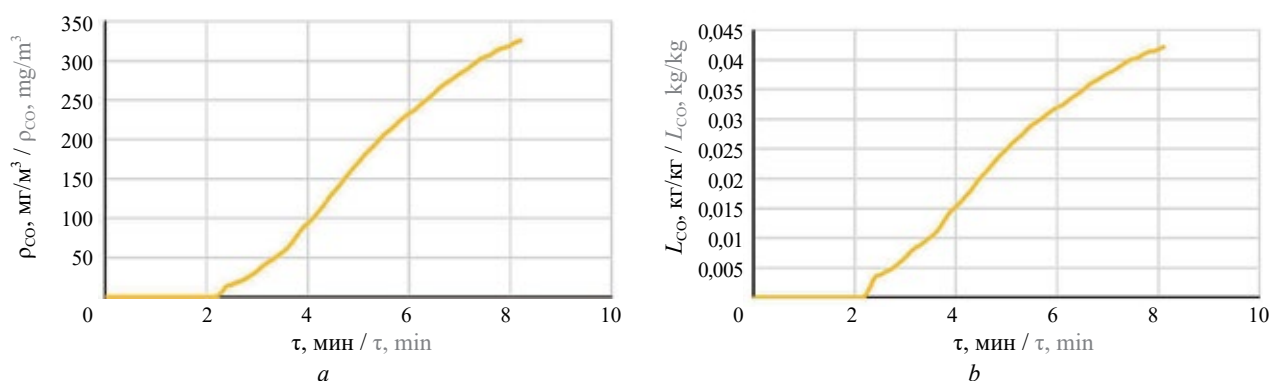


Рис. 4. Зависимости от времени парциальной плотности (а) и удельного коэффициента образования монооксида углерода (b) при $q = 15 \text{ кВт/м}^2$

Fig. 4. Time dependence of partial density (a) and specific coefficient of carbon monoxide formation (b) at $q = 15 \text{ kW/m}^2$

Винилискожа ТВ + ТМ + ЭППУ не превышают критическую концентрацию — $0,00116 \text{ кг/м}^3$.

При этом значения парциальной плотности циановодорода (наиболее опасного газообразного компонента по токсичности) композиции Винилискожа ТВ + ТМ + ЭППУ не достигают критической концентрации — 10^{-4} кг/м^3 , приведенной в учебном пособии [19].

Однако парциальная плотность циановодорода уже на первых минутах эксперимента больше уточненной критической концентрации $10\text{--}5 \text{ кг/м}^3$, определенной авторами в работе [20], что коррелирует с ранее полученными экспериментальными данными [21].

Таким образом, существующая система нормативной оценки пожарной опасности текстильных материалов и изделий внутренней отделки пассажирских вагонов требует существенного уточнения, в том числе для разработки обоснованных рекомендаций по обеспечению безопасной эвакуации людей при пожаре.

Выводы

Анализ отечественных нормативных документов, регламентирующих пожаробезопасность мате-

риалов внутреннего обустройства вагонов пассажирского транспорта, показал необходимость ее совершенствования. Так, вывод о воспламеняемости изделий мягкой мебели должен основываться на результатах испытаний композиции в целом, а не отдельных ее элементов (обивочных материалах).

Для материалов штор и занавесей наряду с оценкой дымообразования и токсичности продуктов горения необходимой и достаточной будет являться оценка воспламеняемости согласно ГОСТ Р 50810².

Для материалов мягких элементов мебели следует определять токсичность продуктов горения и термического разложения, а также дымообразующую способность для ограничения использования из них наиболее опасных.

Для повышения достоверности моделирования распространения ОФП при пожаре необходима актуальная информация о комплексе параметров образования летучих токсичных продуктов горения материалов внутреннего обустройства пассажирских вагонов, позволяющая более точно оценить время безопасной эвакуации пассажиров в случае возникновения пожара.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Магомедов М.Р., Чуйков Д.А., Сметанкина Г.И. Система управления пожарной безопасностью на железнодорожном транспорте // Современные технологии обеспечения гражданской обороны и ликвидации последствий чрезвычайных ситуаций. 2019. № 1 (10). С. 235–238. EDN NUUXFC.
2. Елисеев И.Б. Методика оценки и способы снижения пожарной опасности пассажирских вагонов железнодорожного подвижного состава : дис. ... канд. техн. наук. СПб., 2019. 122 с. EDN SNOUCN.
3. Алисултанов М.А. Анализ особенностей развития и последствий пожаров в железнодорожных пассажирских вагонах // Актуальные проблемы строительства, ЖКХ и техносферной безопасности : сб. тр. конф. Волгоград, 2023. С. 111–113. EDN LVJMOV.
4. Елисеев И.Б., Фомин А.В. Показатели динамики распространения опасных факторов пожара двухэтажных пассажирских вагонов // Вестник Санкт-Петербургского университета Государственной противопожарной службы МЧС России. 2018. № 2. С. 110–120. EDN VKHKRP.
5. Малыгин И.Г., Таранцев А.А., Иванов С.А., Наумушкина К.А., Столярова А.А. Об обеспечении пожарной безопасности двухэтажных вагонов // Пожаровзрывобезопасность/Fire and Explosion Safety. 2017. № 26 (7). С. 28–38. DOI: 10.18322/PVB.2017.26.07.28-38
6. Camillo A., Guillaume E., Rogaume T., Allard A., Didieux F. Risk analysis of fire and evacuation events in the European railway transport network // Fire Safety Journal. 2013. No. 60. Pp. 25–36. DOI: 10.1016/j.firesaf.2013.04.004
7. Abdel Gawad A.F., Radhwi M.N. Simulation of movement of fire smoke and evacuation for suburban trains: Part I, Smoke movement // Twelfth International Conference of Fluid Dynamics (ICFD 12), 2016, Cairo, Egypt. URL: https://www.researchgate.net/publication/312128535_Simulation_of_Movement_of_Fire_Smoke_and_Evacuation_for_Suburban_Trains_Part_I_Smoke_Movement
8. Radhwi M.N., AbdelGawad A.F. Simulation of movement of fire smoke and evacuation for suburban trains: Part II, Evacuation // Twelfth International Conference of Fluid Dynamics (ICFD 12), 2016, Cairo, Egypt. URL: https://www.researchgate.net/publication/312128446_Simulation_of_Movement_of_Fire_Smoke_and_Evacuation_for_Suburban_Trains_Part_II_Evacuation
9. Liangyuan Qi, Liang Chen, Wei Cai, Chuanshen Wang, Bangyu Wang, Yuan Hu et al. Intelligent polyester fabric with fire safety for personal temperature management // Chemical Engineering Journal. 2023. No. 475. Pp. 146–272. DOI: 10.1016/j.cej.2023.146272
10. Malucelli G. Textile finishing with biomacromolecules: A low environmental impact approach in flame retardancy. The Impact and Prospects of Green Chemistry for Textile Technology // Woodhead Publishing. 2019. Pp. 251–279. DOI: 10.1016/B978-0-08-102491-1.00009-5
11. Chen J., Dul S., Lehner S., Jovic M., Gaan S., Heuberger M. et al. Mechanical recycling of PET containing mixtures of phosphorus flame retardants // Journal of Materials Science & Technology. 2024. No. 194. Pp. 167–179. DOI: 10.1016/j.jmst.2024.01.035
12. Коновал И.А. Совершенствование систем жизнеобеспечения пассажирских вагонов для создания комфортных и безопасных условий проезда : дис. ... канд. техн. наук. М., 2022. 228 с. URL: https://rusneb.ru/catalog/000199_000009_012355256
13. Sharma V., Agarwal Sh., Mathur A., Singhal Sh., Wadhwa Sh. Advancements in nanomaterial based flame-retardants for polymers : a comprehensive overview // Journal of Industrial and Engineering Chemistry. 2024. No. 133. Pp. 38–52. DOI: 10.1016/j.jiec.2023.12.010
14. 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
15. Cheng Zh., Liao D., Hu X., Li W., Xie Ch., Zhang H. et al. Synergistic fire-retardant effect between expandable graphite and ferrocene-based non-phosphorus polymer on polypropylene // Polymer Degradation and Stability. 2020. No. 178. Pp. 109–201. DOI: 10.1016/j.polymdegradstab.2020.109201
16. Liang S., Liu J., Guo Y., Luo J., Liu H., Peng S. Role of expandable graphite on flame retardancy, smoke suppression, and acid resistance of polypropylene/magnesium hydroxide composites // Polymer Engineering and Science. 2022. No. 62 (10). Pp. 3168–3179. DOI: 10.1002/pen.26093
17. Pang X., Zhang W., Meng Y., Ma M., Xu J. Effect of expansion temperature on the properties of expanded graphite and modified linear low density polyethylene // International Polymer Processing. 2022. No. 37 (3). Pp. 271–286. DOI: 10.1515/ipp-2022-0003
18. Середина М.А. Снижение пожарной опасности полимерных материалов различной химической природы // Технология текстильной промышленности. 2021. № 5 (395). С. 126–132. DOI: 10.47367/0021-3497_2021_5_126. EDN TYRDKS.
19. Кошмаров Ю.А. Прогнозирование опасных факторов пожара в помещении. М. : Академия ГПС МВД России, 2000. 118 с.

20. Пузач С.В., Константинова Н.И., Акперов Р.Г., Овчинников А.О. Исследование параметров токсичности продуктов горения мягких элементов мебели // Пожаровзрывобезопасность/Fire and Explosion Safety. 2024. № 33 (1). С. 51–59. DOI: 10.22227/0869-7493.2024.33.01.51-59
21. Пузач С.В., Болдрушкиев О.Б. Определение удельного коэффициента образования и критической парциальной плотности циановодорода и монооксида углерода при пожаре в помещении // Пожаровзрывобезопасность/Fire and Explosion Safety. 2019. № 28 (5). С. 19–26. DOI: 10.18322/PVB.2019.28.05.19-26

REFERENCES

1. Magomedov M.R., Chuykov D.A., Smetankina G.I. Fire safety management system by railway transport. *Pozharnaya bezopasnost': problemy i perspektivy/Fire safety: problems and prospects*. 2019; 1(10):235-238. EDN NUUXFC. (rus).
2. Eliseev I.B. Methodology for assessing and reducing fire hazard in passenger cars of railway rolling stock. *Dissertation of the candidate of technical sciences*. St. Petersburg, 2019; 122. EDN SNOUCN. (rus).
3. Alisultanov M.A. *Analysis of the development features and consequences of fires in railway passenger cars : materials of Conference*. Volgograd, 2023; 111-113. EDN LVJMOB. (rus).
4. Eliseev I.B., Fomin A.V. Indicators of dynamics of distribution of hazardous factors of fire of two-storage passenger wagons. *Bulletin of Saint-Petersburg University of State fire Service of EMERCOM of Russia*. 2018; 2:110-120. EDN SNOUCN. (rus).
5. Malygin I.G., Tarantsev A.A., Ivanov S.A., Naumushkina K.A., Stolyarova A.A. On en-suring the fire safety of double-decker railway cars. *Pozharovzryvbezopasnost/Fire and Explosion Safety*. 2017; 26(7):28-38. DOI: 10.18322/PVB.2017.26.07.28-38 (rus).
6. Camillo A., Guillaume E., Rogaume T., Allard A., Didieux F. Risk analysis of fire and evacuation events in the European railway transport network. *Fire Safety Journal*. 2013; 60:25-36. DOI: 10.1016/j.firesaf.2013.04.004
7. Abdel Gawad A.F., Radhwi M.N. Simulation of movement of fire smoke and evacuation for suburban trains: Part I, Smoke movement. *Twelfth International Conference of Fluid Dynamics (ICFD 12), 2016, Cairo, Egypt*. URL: https://www.researchgate.net/publication/312128535_Simulation_of_Movement_of_Fire_Smoke_and_Evacuation_for_Suburban_Trains_Part_I_Smoke_Movement
8. Radhwi M.N., AbdelGawad A.F. Simulation of movement of fire smoke and evacuation for suburban trains: Part II, Evacuation. *Twelfth International Conference of Fluid Dynamics (ICFD 12), 2016, Cairo, Egypt*. URL: https://www.researchgate.net/publication/312128446_Simulation_of_Movement_of_Fire_Smoke_and_Evacuation_for_Suburban_Trains_Part_II_Evacuation
9. Liangyuan Qi, Liang Chen, Wei Cai, Chuanshen Wang, Bangyu Wang, Yuan Hu et al. Intelligent polyester fabric with fire safety for personal temperature management. *Chemical Engineering Journal*. 2023; 475:146-272. DOI: 10.1016/j.cej.2023.146272
10. Malucelli G. Textile finishing with biomacromolecules: A low environmental impact approach in flame retardancy. The Impact and Prospects of Green Chemistry for Textile Technology. *Woodhead Publishing*. 2019; 251-279. DOI: 10.1016/B978-0-08-102491-1.00009-5
11. Chen J., Dul S., Lehner S., Jovic M., Gaan S., Heuberger M. et al. Mechanical recycling of PET containing mixtures of phosphorus flame retardants. *Journal of Materials Science & Technology*. 2024; 194:167-179. DOI: 10.1016/j.jmst.2024.01.035
12. Konoval I.A. *Improvement of life support systems of passenger cars to create comfortable and safe travel conditions : Dissertation of the candidate of technical sciences*. Moscow, 2022; 228. URL: https://rusneb.ru/catalog/000199_000009_012355256 (rus).
13. Sharma V., Agarwal Sh., Mathur A., Singhal Sh., Wadhwa Sh. Advancements in nanomaterial based flame-retardants for polymers : a comprehensive overview. *Journal of Industrial and Engineering Chemistry*. 2024; 133:38-52. DOI: 10.1016/j.jiec.2023.12.010
14. Galiguzov A.A., Yashin N.V., Avdeev V.V. Thermal stability of fire-retardant materials based on PVC compounds of various compositions. *Plasticheskie massy*. 2023; 11-12:21-25. DOI: 10.35164/0554-2901-2023-11-12-21-25 (rus).
15. Cheng Zh., Liao D., Hu X., Li W., Xie Ch., Zhang H. et al. Synergistic fire-retardant effect between expandable graphite and ferrocene-based non-phosphorus polymer on polypropylene. *Polymer Degradation and Stability*. 2020; 178:109-201. DOI: 10.1016/j.polyimdeggradstab.2020.109201
16. Liang S., Liu J., Guo Y., Luo J., Liu H., Peng S. Role of expandable graphite on flame retardancy, smoke suppression, and acid resistance of polypropylene/magnesium hydroxide composites. *Polymer Engineering and Science*. 2022; 62(10):3168-3179. DOI: 10.1002/pen.26093
17. Pang X., Zhang W., Meng Y., Ma M., Xu J. Effect of expansion temperature on the properties of expanded graphite and modified linear low density polyethylene. *International Polymer Processing*. 2022; 37(3):271-286. DOI: 10.1515/ipp-2022-0003

18. Seredina M.A. Reducing the fire hazard of polymeric materials of various chemical nature. *Technology of textile industry*. 2021; 5(395):126-132. DOI: 10.47367/0021-3497_2021_5_126. EDN TYRDKS. (rus).
19. Koshmarov Yu.A. *Forecasting dangerous factors of fire in premises*. Moscow, Academy of GPS of the Ministry of Internal Affairs of Russia, 2000; 118. (rus).
20. Puzach S.V., Konstantinova N.I., Akperov R.G., Ovchinnikov A.O. Investigation of toxicity parameters of combustion products of upholstered furniture elements. *Pozharovzryvbezopasnost/Fire and Explosion Safety*. 2024; 33(1):51-59. DOI: 10.22227/0869-7493.2024.33.01.51-59 (rus).
21. Puzach S.V., Boldrushkiev O.B. Defining the specific formation coefficient and the critical partial density of hydrogen cyanide and carbon monoxide at the fire indoors. *Pozharovzryvbezopasnost/Fire and Explosion Safety*. 2019; 28(5):19-26. DOI: 10.18322/PVB.2019.28.05.19-26 (rus).

Поступила 05.03.2025, после доработки 15.05.2025;

принята к публикации 21.05.2025

Received March 5, 2025; Received in revised form May 15, 2025;

Accepted May 21, 2025

Информация об авторах

КОНСТАНТИНОВА Наталия Ивановна, д.т.н., профессор, главный научный сотрудник, Всероссийский ордена «Знак Почета» научно-исследовательский институт противопожарной обороны Министерства Российской Федерации по делам гражданской обороны, чрезвычайным ситуациям и ликвидации последствий стихийных бедствий, Россия, 143903, Московская обл., г. Балашиха, мкр. ВНИИПО, 12; РИНЦ ID: 774306; ORCID: 0000-0003-0778-0698; e-mail: konstantinova_n@inbox.ru

ЗУБАНЬ Андрей Владимирович, к.т.н., 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; ResearcherID: AAB-9575-2019; Scopus AuthorID: 55847911600; ORCID: 0000-0002-7799-2058; e-mail: avzuban@mail.ru

ПУЗАЧ Сергей Викторович, д.т.н., профессор, заслуженный деятель науки РФ, начальник кафедры инженерной теплофизики и гидравлики, Академия Государственной противопожарной службы Министерства Российской Федерации по делам гражданской обороны, чрезвычайным ситуациям и ликвидации последствий стихийных бедствий, Россия, 129366, г. Москва, ул. Бориса Галушкина, 4; ResearcherID: U-2907-2019; AuthorID: 7003537835; ORCID: 0000-0001-7234-1339; e-mail: puzachsv@mail.ru

Вклад авторов:

Константинова Н.И. — научное руководство; концепция исследования; развитие методологии; написание исходного текста; итоговые выводы.

Зубань А.В. — концепция исследования; развитие методологии; доработка текста; итоговые выводы.

Пузач С.В. — концепция исследования; развитие методологии; доработка текста; итоговые выводы.

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Information about the authors

Nataliya I. KONSTANTINOVA, Dr. Sci. (Eng.), Professor, principle researcher, All-Russian Research Institute for Fire Protection of Ministry of Russian Federation for Civil Defense, Emergencies and Elimination of Consequences of Natural Disasters, VNIPO, 12, Balashikha, Moscow Region, 143903, Russian Federation; ID RSCI: 57195464313; ORCID: 0000-0003-0778-0698; e-mail: konstantinova_n@inbox.ru

Andrey V. ZUBAN, 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; ResearcherID: AAB-9575-2019; Scopus AuthorID: 55847911600; ORCID: 0000-0002-7799-2058; e-mail: avzuban@mail.ru

Sergey V. PUZACH, Dr. Sci. (Eng.), Professor, the Honored Scientist of the Russian Federation, Head of Thermal Physics and Hydraulic Department, the State Fire Academy of the Ministry of Russian Federation for Civil Defense, Emergencies and Elimination of Consequences of Natural Disasters, Boris Galushkina St., 4, Moscow, 129366, Russian Federation; ResearcherID: U-2907-2019, AuthorID: 7003537835, ORCID: 0000000172341339; e-mail: puzachsv@mail.ru

Contribution of the authors:

Konstantinova N.I. — scientific management; research concept; methodology development; participation in development of curricula and their implementation; writing the draft; final conclusions.

Zuban A.V. — research concept; methodology development; follow-on revision of the text; final conclusions.

Puzach S.V. — research concept; methodology development; follow-on revision of the text; final conclusions.

The authors declare no conflicts of interests.

Взрывоопасность локальной деформации пространства

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. Анализ взрывоопасности локального изменения хода времени в земной атмосфере (Полетаев, 2024) способствовал развитию релятивистского направления исследований в области обеспечения пожаро- и взрывобезопасности объектов. Основой анализа явилась зависимость хода часов от положения часов в равномерно ускоренной системе отсчета (Эйнштейн, 1907). Разумно полагать, что локальное изменение хода времени сопровождается локальной деформацией пространства (визуально наблюдаемым изменением длины линейки), которая также становится признаком появления локальной взрывоопасности.

Постановка и решение задачи. Поставлена и решена задача о взаимосвязи (для удаленного наблюдателя) относительных изменений хода часов и длины связанной с часами линейки при их перемещениях в однородном поле тяжести. Основой решения являлся закон равенства инертной и тяжелой массы, который позволил использовать математический маятник для установления искомой взаимосвязи. Показано, что в первом приближении относительное изменение длины линейки в два раза превышает относительное изменение хода часов (далее — соотношение поправок).

Обсуждение результатов и выводы. Изменения в локальной области земной атмосферы характеризуются ростом (снижением) давления в случае уменьшения (увеличения) длины помещенной в эту область стандартной линейки. Существенные (на порядки) взрывоопасные локальные изменения давления происходят при относительном изменении длины линейки в пределах $\pm 2 \cdot 10^{-12}$. Отмечено, что полученное соотношение поправок позволяет производить в первом приближении расчет некоторых эффектов теории гравитации, например, угла преломления луча света тяжелой массой или уточнения закона тяготения Ньютона, без привлечения известных уравнений гравитационного поля (Эйнштейн, 1915).

Ключевые слова: взрывобезопасность; релятивистские поправки; изменение хода времени; изменение размера при ускорении; математический маятник.

Для цитирования: Полетаев Н.Л. Взрывоопасность локальной деформации пространства // Пожаровзрывобезопасность/Fire and Explosion Safety. 2025. Т. 34. № 3. С. 34–39. DOI: 10.22227/0869-7493.2025.34.03.34-39

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

Explosion hazard of local space deformation

Nikolay L. Poletaev ✉

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

ABSTRACT

Introduction. The analysis of the explosion hazard of local changes in the time course in the Earth's atmosphere (Poletaev, 2024) contributed to the development of relativistic research in the field of ensuring fire and explosion safety of facilities. The analysis was based on the dependence of the clock rate on the position of the clock in a uniformly accelerated reference frame (Einstein, 1907). It is reasonable to assume that local changes in the course of time are accompanied by local deformation of space (a visually observable change in the length of the ruler), which also becomes a sign of the appearance of local explosion hazard.

Problem statement and solution. The problem of the relationship (for a distant observer) of the relative changes in the movement of the clock and the length of the ruler associated with the clock, as they move in a homogeneous gravity field, is posed and solved. The basis of the solution was the law of equality of inert and heavy mass or correction of Newton's law of gravitation, which allowed using a mathematical pendulum to establish the desired relationship. It is shown that, to the first approximation, the relative change in the length of the ruler is twice as large as the relative change in the movement of the clock (hereinafter referred to as the correction ration).

Discussion of the results and conclusions. Changes in the local area of the Earth's atmosphere are characterized by an increase (decrease) in pressure in the case of a decrease (increase) in the length of a standard ruler placed in this area. Significant (by orders of magnitude) explosive local pressure changes occur with a relative change in the length of the ruler in the range of $\pm 2 \times 10^{-12}$. It is noted that the obtained correction ratio makes it possible to calculate, in a first approximation, some effects of the theory of gravity, for example, the angle of refraction of a ray of light by a heavy mass or correction of Newton's law of gravitation, without involving the known equations of the gravitational field (Einstein, 1915).

Keywords: explosion safety; relativistic corrections; time change; size change during acceleration; mathematical pendulum

For citation: Poletaev N.L. Explosion hazard of local space deformation. *Pozharovzryvobezopasnost/Fire and Explosion Safety*. 2025; 34(3):34-39. DOI: 10.22227/0869-7493.2025.34.03.34-39 (rus).

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

Введение

В работе [1] сообщалось о важности переписки ФГБУ ВНИИПО МЧС России с гражданами (далее — заявителями), искренне желающими усовершенствовать нормы и правила пожарной безопасности объектов промышленности и сельского хозяйства. Особое значение имеют случаи переписки с заявителями, чья многолетняя профессиональная деятельность связана с решением проблем оценки пожаро- и взрывоопасности объектов, а также связанных с этими проблемами ответами на вопросы пожарно-технической экспертизы. Такое взаимодействие имеет большое взаимное значение. С одной стороны, переписка позволяет выявить актуальные темы научных исследований. С другой — переписка предоставляет возможность разъяснить инициативным гражданам и коллегам объективную трактовку распространенных в обиходе понятий, неверное толкование которых может приводить к противоречиям. В ряде случаев упомянутые подробные разъяснения не могут ограничиться объемом письма и требуют написания научной статьи.

Примером подробного разъяснения является работа [1], в которой утверждение одного из заявителей, что время является материальным объектом, подверглось теоретическому анализу. Результатом анализа явилось соотношение, устанавливающее связь между изменением хода времени в локальной области пространства у поверхности Земли и взрывоопасностью этой области из-за возникновения в ней поля ускорения и связанных с этим ускорением перемещений воздуха. Другими словами, работа [1] открыла возможность утверждать: если часы, помещенные в локальную область пространства (далее — зону), отсчитывают время быстрее или медленнее, чем это делают такие же часы вне зоны, то внутри зоны устанавливается соответственно пониженное или повышенное давление воздуха. Изменение давления может достигать тысячекратных значений уже при малой относительной разнице хода часов порядка $\pm 10^{-12}$. Фактически, работа [1] наметила релятивистское направление исследований пожаровзрывоопасности объектов.

Тематика настоящей работы порождена вторым утверждением упомянутого выше заявителя, которое сводилось к тому, что «пустое» пространство также является материальным объектом. У специалистов института были сомнения в правомерности такого утверждения, изложенные в устном ответе заявителю. Тем не менее второе утверждение заявителя заставило обратить более серьезное внимание на возможную связь между искривлением пространства в некоторой зоне вблизи поверхности Земли и взрывоопасностью этой зоны.

Наличие такой связи демонстрирует следующее рассуждение. Согласно общей теории относительности (ОТО), деформация пространства (здесь и далее применение термина «искривление пространства» представляется менее удачным) неизбежно связана с изменением хода времени. Поэтому разумно полагать, что локальная деформация пространства вблизи поверхности Земли с необходимостью вызовет локальное изменение хода времени, которое, согласно работе [1], приведет к возникновению взрывоопасности. Здесь и в дальнейшем под деформацией пространства в зоне понимаем визуально фиксируемое отличие длины стандартной линейки, расположенной вне зоны, от длины такой же линейки, помещенной в зону. Во избежание недоумений отметим, что упоминание визуальной фиксации относится к мысленному эксперименту из-за наличия эффектов, искажающих изображение линейки. Таким эффектом в условиях атмосферы будет преломление (рефракция) света [2–4] вследствие различия плотностей воздуха в зоне и вне зоны. В условиях абсолютного вакуума к таким эффектам относится «гравитационная линза» [5–7].

С учетом вышесказанного цель работы сводится к установлению связи между деформацией пространства и изменением хода времени, расширяющей представления о последствиях деформации пространства. Учитывая трудности освоения ОТО в полном объеме, поиск искомой связи будем осуществлять простым и наглядным способом.

Постановка задачи

Теоретическое исследование зависимости хода часов от расположения часов в равномерно ускоренной системе отсчета впервые проводилось в работе [8]. Там же предложено использовать аналогичную зависимость для локального стационарного однородного поля тяжести с соответствующим значением ускорения свободного падения – принцип эквивалентности (далее – ПЭ). Впоследствии эта аналогия была существенно ограничена как по промежутку времени, в течение которого она правомерна, так и по размерам области сопоставления [9]. Тем не менее полученное в работе [8] соотношение:

$$\frac{\delta T}{T_0} = \frac{\Phi}{c_0^2} \quad (1)$$

считается справедливым в первом приближении по малому параметру $|\Phi|/c_0^2 \ll 1$ и широко используется в исследованиях гравитационных полей [10, 11] и при совершенствовании атомных часов [12–14]. Здесь и далее $\delta T = T - T_0$; c_0 — скорость света вне поля тяжести, где гравитационный потенциал (далее — потенциал) поля $\Phi = 0$.

Соотношение (1) выражает связь между отрезками времени T_0 и T , отмеренными часами, расположенными в точках с потенциалами, равными нулю, и Φ , соответственно, наблюдаемую из первой точки. Другими словами, наблюдатель из точки поля, где $\Phi = 0$ (его обычно именуют «отдаленным» наблюдателем), отмечает, что за период времени T_0 , отмеренный его часами, точно такие же часы в точке с потенциалом Φ отмерили иной промежуток времени, равный T .

Естественно полагать, что, с точки зрения этого наблюдателя, находящаяся у него линейка длиной L_0 при размещении в точке с потенциалом Φ также претерпит изменение размера на $\delta L = L - L_0$, вычисление которого относится к цели настоящей работы. Ошибочное применение правила ПЭ

$$\delta L = 0 \quad (2)$$

вне области обоснованного использования ПЭ замечено у автора соотношения (1) (см. [8, 15]) и многих известных исследователей (см. обзор [16]). Для надежного определения искомого изменения в настоящей работе будет использован закон равенства инертной и тяжелой массы, подтвержденный с высокой точностью [17].

Решение задачи

Рассмотрим, следуя мысленному эксперименту из работы [8], область пространства (далее — зону), в которой поле тяжести можно считать стационарным и однородным с ускорением свободного падения, постоянным по величине (g) и направлению.

В качестве средства измерения времени в различных точках зоны будем использовать математический маятник, длина подвеса которого вне поля тяготения равна L_0 . Для использования соотношений предыдущего раздела выберем длину L_0 такой, чтобы величина $2\pi\sqrt{L_0/g}$ совпала с величиной T_0 из предыдущего раздела.

Ввиду ожидаемой (для отдаленного наблюдателя) зависимости длины подвеса от его положения в поле тяжести представим длину подвеса в виде:

$$L = L_0 + \delta L, \quad (3)$$

где изменение δL зависит от потенциала точки, в которой расположен маятник (здесь и далее под точкой расположения понимается окрестность этой точки ввиду конечной длины подвеса маятника).

Следуя [18], запишем выражение для «единицы хода» маятниковых часов с длиной подвеса (3):

$$\tau = 2\pi\sqrt{R/g},$$

где R — радиус кривизны бесконечно малой траектории груза (отрезка эллипса).

При отсутствии согласно (2) деформации траектории поперек направления g , несложно показать, что $R = L_0^2/L$, и возникает

непривычное для евклидовой геометрии падение τ с ростом L . С учетом (1), постоянства g и пропорции $T \sim 1/\tau$ в первом приближении получим

$$\frac{\delta L}{L_0} = 2 \frac{\delta T}{T_0}, \quad (4)$$

Разумно полагать, что измерения времени с помощью маятника должны приводить к той же зависимости (1), полученной с помощью более известных (например, атомных) часов. Из выражений (1) и (4) имеем:

$$\frac{\delta L}{L_0} = 2 \frac{\Phi}{c_0^2}. \quad (5)$$

Из выражений (1), (4) и (5) следует, что с точки зрения отдаленного наблюдателя при смещениях его линейки с часами в стационарном и однородном поле тяжести относительное изменение размера линейки в два раза превышает относительное изменение хода часов.

Оценим в первом приближении влияние потенциала рассматриваемого поля тяжести на скорость, длину волны и частоту луча света в рамках следующего мысленного эксперимента. Допустим, что в точку поля с потенциалом Φ переместился помощник наблюдателя, захвативший с собой линейку, длина которой вне поля тяжести совпадает с дли-

ной линейки наблюдателя L_0 , и атомные (цезиевые) часы. Физический смысл (1) состоит в том, что свет монохроматического излучения (цезиевых часов) с частотой $\nu_0 = 1/T_0$, испущенный наблюдателем в сторону помощника, воспринимается последним как луч света с иной частотой $\nu = 1/T$, не совпадающей с частотой его цезиевых часов. Изменение частоты $\delta\nu = \nu - \nu_0$ и изменение скорости гребня $\delta c = c - c_0$ волны света в бесконечно малой окрестности точки поля удовлетворяют соотношениям [15]

$$\frac{\delta\nu}{\nu_0} = -\frac{\Phi}{c_0^2}, \quad \frac{\delta c}{c_0} = \frac{\Phi}{c_0^2}, \quad (6)$$

Из (6) следует изменение длины λ и скорости гребня волны света на конечных ($\sim\lambda$) масштабах

$$\frac{\delta\lambda}{\lambda_0} = 2\frac{\Phi}{c_0^2}, \quad \frac{\delta c}{c_0} = 2\frac{\Phi}{c_0^2}, \quad (7)$$

где $\delta\lambda = \lambda - \lambda_0$;

c, λ — воспринимаемая удаленным наблюдателем скорость и длина волны света в точке с потенциалом Φ ;

$\lambda = c/\nu$; $\lambda_0 = c_0/\nu_0$ — длина волны света вне поля тяжести ($\Phi = 0$)

Из подобия соотношений (5) и (7) и независимости (7) от направления движения волны света разумно полагать независимость локального относительного изменения длины линейки $\delta L/L_0$ от ориентации линейки в пространстве.

Соотношения (5) и (7) в соответствии с распространенным правилом из работы [8] разумно использовать при анализе процессов в неоднородных (т.е. реальных) стационарных слабых гравитационных полях. Один из таких процессов будет рассмотрен в следующем разделе работы.

Результаты и их обсуждение

1. Основным результатом работы является установление связи между локальной деформацией пространства и соответствующим такой деформации локальным изменением хода времени. Данная связь с учетом выводов работы [1] предполагает возможность использовать локальную деформацию пространства в качестве признака взрывоопасности области деформированного пространства. С учетом выражения (4) и выводов работы [1] существенная взрывоопасность возникает при величине относительной деформации пространства порядка $|\delta L|/L_0 \approx 2 \cdot 10^{-12}$.

2. Независимость (4) от потенциала Φ придает соотношению (4) характер универсального правила стационарного гравитационного поля.

3. Соотношения (1), (5)–(7) позволяют в первом приближении получать правильные оценки некоторых эффектов, вызванных полем тяжести, не обращаясь к общим уравнениям гравитационного поля [19]. Это, в частности, относится к расчету отклонения луча света, проходящего вблизи поверхности Солнца, заниженный результат которого в [15] объясняется ошибочным использованием принципа Гюйгенса для световой волны, частота которой зависит от места в поле тяжести. Ошибка приводит к необходимости использования в [15] неверных соотношений:

$$\frac{\delta\lambda}{\lambda_0} = \frac{\Phi}{c_0^2}, \quad \frac{\delta c}{c_0} = \frac{\Phi}{c_0^2},$$

Переход в [15] к правильным соотношениям (7) немедленно приводит к точному (в первом приближении) результату расчета без необходимости обращения к ОТО [20]. Другим примером является коррекция закона тяготения Ньютона, позволяющая получить правильное значение прецессии перигелия Меркурия в евклидовом приближении:

$$g = \frac{GM}{r^2} \left(1 + 3 \frac{GM}{c_0^2 r} \right),$$

где g — направленное к Солнцу ускорение Меркурия;

G — гравитационная постоянная;

M — масса Солнца;

r — расстояние между Меркурием и Солнцем.

Выводы

1. В первом приближении найдена связь между локальной относительной деформацией пространства и изменением хода времени в области пространства конечного размера.

2. Существенная взрывоопасность локальной деформации пространства возникает при относительной величине деформации порядка $\pm 2 \cdot 10^{-12}$.

3. Показана возможность получения правильной (в первом приближении) оценки некоторых эффектов, вызванных полем тяжести, без использования общих уравнений этого поля, в частности оценки отклонения луча света тяжелой массой и оценки поправки к закону тяготения Ньютона.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Полетаев Н.Л. Взрывоопасность локального изменения хода времени // Пожаровзрывобезопасность/ Fire and Explosion Safety. 2024. Т. 33. № 6. С. 5–13. DOI: 10.22227/0869-7493.2024.33.06.5-13

2. Auer L.H., Standish E.M. Astronomical Refraction: Computation for All Zenith Angles // *Astronomical Journal*. 2000. No. 119 (5). Pp. 2472–2474. DOI: 10.1086/301325
3. Lehn W.H., van der Werf S. Atmospheric refraction : a history // *Applied Optics*. 2005. No. 44 (27). Pp. 5624–5636. DOI: 10.1364/AO.44.005624
4. Kipping David. The “Terrascope”: On the Possibility of Using the Earth as an Atmospheric Lens // *Publications of the Astronomical Society of the Pacific*. Columbia University, 2019. No. 131 (1005). P. 114503. DOI: 10.1088/1538-3873/ab33c0
5. Huang X., Storfer C., Gu A., Ravi V. Discovering New Strong Gravitational Lenses in the DESI Legacy Imaging Surveys // *The Astrophysical Journal*. 2021. No. 909 (1). P. 27. DOI: 10.3847/1538-4357/abd62b
6. Lonappan A.I., Namikawa T., Piccirilli G., Diego-Palazuelos P. LiteBIRD science goals and forecasts: a full-sky measurement of gravitational lensing of the CMB // *Journal of Cosmology and Astroparticle Physics*. 2024. No. 06. P. 009. DOI: 10.1088/1475-7516/2024/06/009
7. Martinez M.N., Gordon Y., Bechtol K., Cartwright G., Ferguson Peter S., Gorsuch M. Finding Lensed Radio Sources with the Very Large Array Sky Survey // *The Astrophysical Journal*. 2025. No. 979 (2). P. 132. DOI: 10.3847/1538-4357/ad9c37
8. Einstein A. Über das Relativitätsprinzip und die aus demselben gezogenen Folgerungen // *Radioaktivität u. Elektronik*. 1907. Bd. 4. S. 411. (Перевод: А. Эйнштейн. О принципе относительности и его следствиях. Собрание научных трудов. Т. I. «Наука». М., 1965. С. 65–114).
9. Фок В.А. Теория пространства, времени и тяготения. М. : ГИТТЛ, 1955. 504 с.
10. Pound R.V., Rebka G.A. Apparent Weight of Photons // *Physical Review Letters*. 1960. No. 4. P. 337. DOI: 10.1103/PhysRevLett.4.337
11. Delva P., Puchades N., Schönemann E., Dilssner F., Courde C., Bertone S. et al. Gravitational Redshift Test Using Eccentric Galileo Satellites // *Physical Review Letters*. 2018. No. 121 (23). DOI: 10.1103/physrevlett.121.231101
12. Kennedy C.J., Oelker E., Robinson J.M., Bothwell T., Kedar D., Milner W.R. et al. Precision Metrology Meets Cosmology: Improved Constraints on Ultralight Dark Matter from Atom-Cavity Frequency Comparisons // *Physical Review Letters*. 2020. No. 125 (20). DOI: 10.1103/physrevlett.125.201302
13. Bothwell T., Kennedy C.J., Aepli A., Kedar D. Resolving the gravitational redshift across a millimetre-scale atomic sample // *Nature*. 2022. Vol. 602. Pp. 420–424. DOI: 10.1038/s41586-021-04349-7
14. Roura A. Atom interferometer as a freely falling clock for time-dilation measurements // *Quantum Science and Technology*. 2025. No. 10 (2). DOI: 10.1088/2058-9565/ad9e2e
15. Einstein A. Über den Einfluss der Schwerkraft auf die Ausbreitung des Lichtes. *Ann. Phys.* 1911. Bd. 35. Pp. 898–908. (Перевод: А. Эйнштейн. О влиянии силы тяжести на распространение света. Собрание научных трудов. Т. I. «Наука». М., 1965. С. 165–174).
16. Д'Абрамо Д. О выводе гравитационного сдвига частоты из закона сохранения энергии // *Успехи физических наук*. 2025. Т. 195. № 1. С. 94–100. DOI: 10.3367/UFN.2024.10.039774
17. Touboul P., Métris G., Rodrigues M., Bergé J., Robert A., Baghi Q. et al. MICROSCOPE mission: final results of the test of the Equivalence Principle // *Physical Review Letters*. 2022. No. 129. P. 121102. DOI: 10.1103/PhysRevLett.129.121102
18. Ландау Л.Д., Лифшиц Е.М. Теоретическая физика: Механика. 4-е изд. М. : Наука, 1988. С. 135.
19. Einstein A. Die Relativitätstheorie. In book “Die Physik”. Unter Redaktion von E. Lechner. T. 3. Abt. 3. Bd. 1. Leipzig, Teubner, 1915. Pp. 703–713. (Перевод: А. Эйнштейн, Теория относительности. Собрание научных трудов. Т. I. «Наука». М., 1965. С. 410–424).
20. Einstein A. Erklärung der Perihelbeivegung der Merkur aus der allgemeinen Relativitätstheorie. *Sitzungsber. preuss. Akad. Wiss*, 1915. Bd. 47 (2). Pp. 831–839. (Перевод: А. Эйнштейн. Объяснение движения перигелия Меркурия в общей теории относительности. Собрание научных трудов. Т. I. «Наука». М., 1965. С. 439–446).

REFERENCES

1. Poletaev N.L. Explosion hazard of time course local change. *Pozharovzryvobezopasnost/Fire and Explosion Safety*. 2024; 33(6):5-13. DOI: 10.22227/0869-7493.2024.33.06.5-13 (rus).
2. Auer L.H., Standish E.M. Astronomical Refraction: Computation for All Zenith Angles. *Astronomical Journal*. 2000; 119(5):2472-2474. DOI: 10.1086/301325
3. Lehn W.H., van der Werf S. Atmospheric refraction : a history. *Applied Optics*. 2005; 44(27):5624-5636. DOI: 10.1364/AO.44.005624
4. Kipping David. The “Terrascope”: On the Possibility of Using the Earth as an Atmospheric Lens. *Publications of the Astronomical Society of the Pacific*. Columbia University, 2019; 131(1005):114503. DOI: 10.1088/1538-3873/ab33c0

5. Huang X., Storfer C., Gu A., Ravi V. Discovering New Strong Gravitational Lenses in the DESI Legacy Imaging Surveys. *The Astrophysical Journal*. 2021; 909(1):27. DOI: 10.3847/1538-4357/abd62b
6. Lonappan A.I., Namikawa T., Piccirilli G., Diego-Palazuelos P. et al. LiteBIRD science goals and forecasts: a full-sky measurement of gravitational lensing of the CMB. *Journal of Cosmology and Astroparticle Physics*. 2024(06):009. DOI: 10.1088/1475-7516/2024/06/009
7. Martinez M.N., Gordon Y., Bechtol K., Cartwright G., Ferguson Peter S., Gorsuch M. et al. Finding Lensed Radio Sources with the Very Large Array Sky Survey. *The Astrophysical Journal*. 2025; 979(2):132. DOI: 10.3847/1538-4357/ad9c37
8. Einstein A. Über das Relativitätsprinzip und die aus demselben gezogenen Folgerungen. *Radioaktivität u. Elektronik*. 1907; 4:411. (ger).
9. Fok V.A. *Theory of space, time and gravity*. Moscow, GITTL, 1955; 504. (rus).
10. Pound R.V., Rebka G.A. Apparent Weight of Photons. *Physical Review Letters*. 1960; 4:337. DOI: 10.1103/PhysRevLett.4.337
11. Delva P., Puchades N., Schönemann E., Dilssner F., Courde C., Bertone S. et al. Gravitational Redshift Test Using Eccentric Galileo Satellites. *Physical Review Letters*. 2018; 121(23). DOI: 10.1103/physrevlett.121.231101
12. Kennedy C.J., Oelker E., Robinson J.M., Bothwell T., Kedar D., Milner W.R. et al. Precision Metrology Meets Cosmology: Improved Constraints on Ultralight Dark Matter from Atom-Cavity Frequency Comparisons. *Physical Review Letters*. 2020; 125(20). DOI: 10.1103/physrevlett.125.201302
13. Bothwell T., Kennedy C.J., Aepli A., Kedar D. Resolving the gravitational redshift across a millimetre-scale atomic sample. *Nature*. 2022; 602:420-424. DOI: 10.1038/s41586-021-04349-714
14. Roura A. Atom interferometer as a freely falling clock for time-dilation measurements. *Quantum Science and Technology*. 2025; 10(2). DOI: 10.1088/2058-9565/ad9e2e
15. Einstein A. Über den Einfluss der Schwerkraft auf die Ausbreitung des Lichtes. *Ann. Phys.* 1911; 35:898-908.
16. D'Abramo G. On gravitational frequency shift derived from energy conservation. *Advances in Physical Sciences*. 2025; 68:87-93. DOI: 10.3367/UFNe.2024.10.039774 (rus).
17. Touboul P., Métris G., Rodrigues M., Bergé J., Robert A., Baghi Q. et al. MICROSCOPE mission: final results of the test of the Equivalence Principle. *Physical Review Letters*. 2022; 129:121102. DOI: 10.1103/PhysRevLett.129.121102
18. Landau L.D., Lifshitz E.M. *Theoretical Physics: Mechanics*. 4th ed. Moscow, Nauka, 1988; 135. (rus).
19. Einstein A. *Die Relativitätstheorie*. In book "Die Physik". Unter Redaktion von E. Lechner. T. 3. Abt. 3. Bd. 1. Leipzig, Teubner. 1915; 703-713.
20. Einstein A. *Erklärung der Perihelbewegung der Merkur aus der allgemeinen Relativitätstheorie*. Sitzungsber. preuss. Akad. Wiss, 1915; 47(2):831-839.

Поступила 28.04.2025, после доработки 21.05.2025;

принята к публикации 22.05.2025

Received April 28, 2025; Received in revised form May 21, 2025;

Accepted May 22, 2025

Информация об авторе

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

Information about the author

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

Разработка морозостойких уплотнительных колец для обеспечения противопожарной безопасности в Арктических регионах РФ

Игорь Сергеевич Макаров¹✉, Афанасий Алексеевич Дьяконов^{1, 2},
Надежда Николаевна Лазарева¹, Алексей Александрович Синяков³,
Евгений Геннадьевич Паренко⁴

¹ Северо-Восточный федеральный университет им. М.К. Аммосова, г. Якутск, Россия

² Институт физико-технических проблем Севера им. В.П. Ларионова Сибирского отделения Российской академии наук, г. Якутск, Россия

³ Федеральная противопожарная служба Государственной противопожарной службы Главного управления МЧС России по Республике Саха (Якутия), г. Якутск, Россия

⁴ АО «Водоканал», г. Якутск, Россия

АННОТАЦИЯ

Введение. В условиях активного освоения Арктики вопрос обеспечения пожарной безопасности становится стратегической задачей. В настоящее время существует проблема затвердевания и поломки уплотнительных колец при наступлении температуры -40°C , при заявленных рабочих температурах -60°C , согласно категории климатических исполнений УХЛ-1, что может привести к трудностям и нештатным ситуациям во время тушения пожаров. Поэтому актуальной задачей становится разработка морозостойких уплотнительных колец. Для увеличения их срока эксплуатации и стойкости к старению необходимо использовать в рецептуре резиновой смеси противостарители.

Цель исследования. Подбор противостарителей для создания рецептуры морозостойких уплотнительных колец на основе бутадиенового каучука марки СКД-В, предназначенных для использования в пожарных рукавах и гидрантах.

Задачи:

1. Определение влияния противостарителей на свойства резиновой смеси на основе бутадиенового каучука СКД-В.
2. Исследование физико-механических и структурных свойств эластомеров.
3. Испытание изготовленных уплотнительных колец на основе разработанной рецептуры в реальных условиях эксплуатации на базе МЧС по Республике Саха (Якутия) и АО «Водоканал».

Объекты и методы исследования. В ходе работы изучали упруго-прочностные свойства, износостойкость, стойкость образцов к воде, твердость, остаточное деформационное сжатие, стойкость к термическому старению и структурные свойства разработанных эластомеров на основе каучука СКД-В.

Результаты и их обсуждение. Противостарители повысили упруго-прочностные свойства, предположительно, за счет стабилизации полимерной сетки, однако при применении IPPD происходит его вымывание и окрашивание воды в желтый цвет. Термическое старение снизило эластичность образцов на 32–56 %, комбинированные системы противостарителей продемонстрировали меньшую деградацию, подтвердив их эффективность. Лабораторные и натурные испытания подтвердили работоспособность разработанных уплотнительных колец в арктических условиях в соответствии с категорией климатических исполнений УХЛ-1.

Заключение. В ходе работы была разработана морозостойкая резиновая смесь. Выбрана комбинация противостарителей нафтам-2 и ацетонанил.

Ключевые слова: Якутия; безопасность; рукавная линия; пожарные гидранты; тушение пожаров; УХЛ-1

Благодарности. Работа выполнена при финансовой поддержке Министерства науки и высшего образования Российской Федерации НИР по ГЗ № FSRG-2023-0026.

Для цитирования: Макаров И.С., Дьяконов А.А., Лазарева Н.Н., Синяков А.А., Паренко Е.Г. Разработка морозостойких уплотнительных колец для обеспечения противопожарной безопасности в Арктических регионах РФ // Пожаровзрывобезопасность/Fire and Explosion Safety. 2025. Т. 34. № 3. С. 40–49. DOI: 10.22227/0869-7493.2025.34.03.40-49

✉ Макаров Игорь Сергеевич, e-mail: misergeevich@mail.ru

Development of Frost-Resistant Sealing Rings for Fire Safety in the Arctic Regions of the Russian Federation

Igor S. Makarov¹✉, Afanasii A. Dyakonov^{1, 2}, Nadezhda N. Lazareva¹, Alexey A. Sinyakov³, Evgeny G. Parenko⁴

¹ North-Eastern Federal University named after M.K. Ammosova, Yakutsk, Russian Federation

² Institute of Physical and Technical Problems of the North named after V.P. Larionov of the Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences, Yakutsk, Russian Federation

³ Federal Fire Service of the State Fire Service Main Directorate of the Ministry of Emergency Situations of Russia for the Republic of Sakha (Yakutia), Yakutsk, Russian Federation

⁴ JSC "Vodokanal", Yakutsk, Russian Federation

ABSTRACT

Introduction. In the context of active Arctic development, ensuring fire safety has become a strategic task. Currently, there is a problem of hardening and breaking of sealing rings when the temperature drops to -40°C , despite the declared operating temperature of -60°C , according to the UHL-1 climate category. This can lead to difficulties and emergency situations during firefighting. Therefore, the development of frost-resistant sealing rings is a pressing issue. To extend their service life and improve aging resistance, it is necessary to incorporate anti-aging agents into the rubber compound formulation.

The aim of the research is to identify a suitable anti-aging agent for the formulation of frost-resistant sealing rings made from SKD-V butadiene rubber, designed for use in fire hoses and hydrants.

Objectives:

1. Determination of the effect of anti-aging agents on the properties of rubber compounds based on SKD-V butadiene rubber.
2. Investigation of the physico-mechanical and structural properties of elastomers.
3. Testing of the manufactured sealing rings based on the developed formulation under real operating conditions at the Ministry of Emergency Situations of the Republic of Sakha (Yakutia) and JSC "Vodokanal".

Objects and methods of research. The study examined the elastic-strength properties, wear resistance, water resistance of the specimens, hardness, residual compressive deformation, thermal aging resistance and structural properties.

Results and their discussion. Antioxidants improved the elastic-strength properties, presumably due to the stabilization of the polymer network. However, when using IPPD, leaching and water discoloration were observed. Thermal aging reduced the elasticity of the specimens by 32–56 %, while combined systems demonstrated lower degradation, confirming their effectiveness. Laboratory and field tests verified the performance of the developed sealing rings in Arctic conditions in accordance with the UHL-1 climate category.

Conclusions. A frost-resistant rubber compound was developed in the course of the study. A combination of anti-aging agents, Naftam-2 and Acetonil, was selected.

Keywords: Yakutia; safety; frost-resistant sealing rings; hose line; fire hydrants; firefighting

Acknowledgments. This work was financially supported by the Ministry of Science and Higher Education of the Russian Federation and was carried out under state contracts No. FSRG-2023-0026.

For citation: Makarov I.S., Dyakonov A.A., Lazareva N.N., Sinyakov A.A., Parenko E.G. Development of Frost-Resistant Sealing Rings for Fire Safety in the Arctic Regions of the Russian Federation. *Pozharovzryvobezopasnost'/Fire and Explosion Safety*. 2025; 34(3):40-49. DOI: 10.22227/0869-7493.2025.34.03.40-49 (rus).

✉ Igor Sergeevich Makarov, e-mail: misergeevich@mail.ru

Введение

В условиях быстроменяющихся климатических условий и возрастающей активности промышленного освоения Арктики вопрос обеспечения пожарной безопасности приобретает особую актуальность. Одними из ключевых элементов, способствующих безопасности и быстрой сборке пожарных линий в экстремально низких температурах, являются уплотнительные кольца. Традиционные материалы, используемые для изготовления этих элементов, часто не справляются с воздействием суровых арктических условий, что приводит к снижению их эксплуатационных характеристик, утечкам и даже аварийным ситуациям.

Разработка морозостойких уплотнительных колец становится необходимой мерой для повышения без-

опасности объектов, функционирующих в Арктических регионах РФ (рис. 1). Эти специализированные компоненты должны не только сохранять эластичность и герметичность при экстремально низких температурах, но и противостоять постоянным механическим нагрузкам. Новые материалы и технологические решения, направленные на улучшение характеристик уплотнений, открывают перспективы для создания оборудования, способного функционировать в условиях длительной эксплуатации в Арктике без потери качества и надежности [1]. Актуальность темы обусловлена не только сложностью климатических условий, но и стратегическим значением Арктики

¹ Арктическая зона Российской Федерации. URL: <https://erdc.ru/about-azrf/>

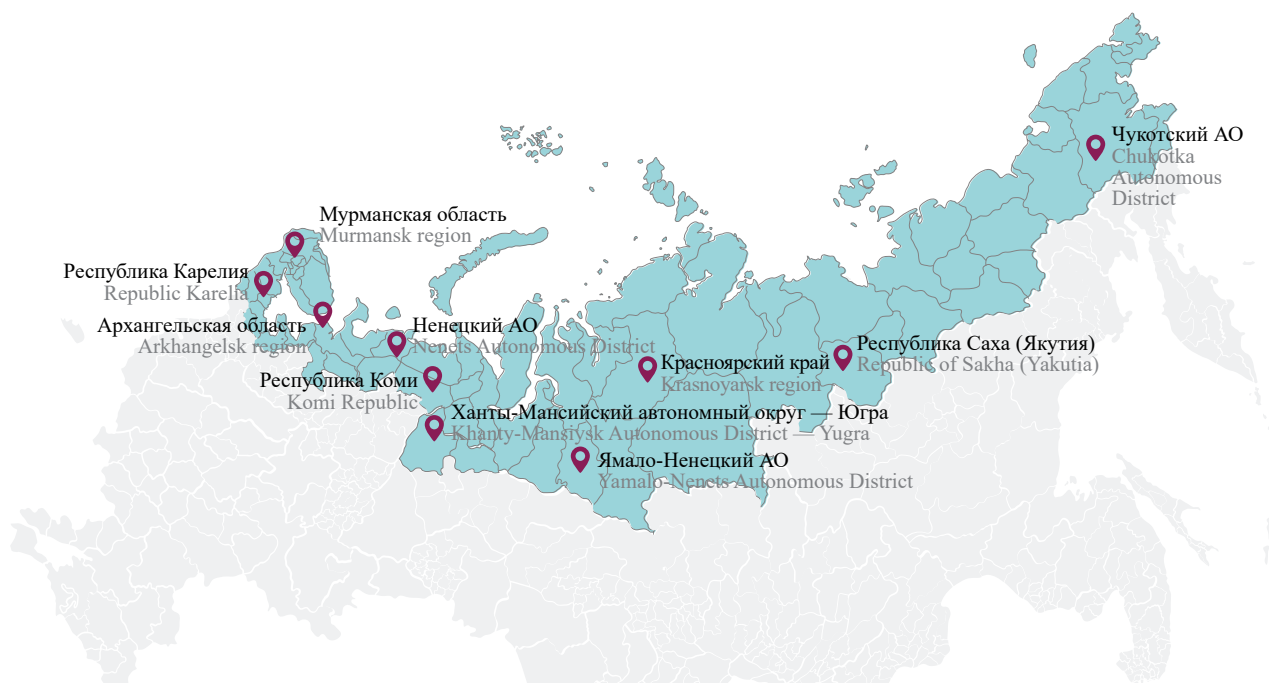


Рис. 1. Арктическая зона Российской Федерации¹
Fig. 1. The Arctic Zone of the Russian Federation¹

для энергетической и транспортной инфраструктуры России [2]. Так, в настоящее время ведется активная разработка морозостойких уплотнительных резин российскими [3, 4] и зарубежными учеными [5–7].

На территории Якутии и других арктических регионов² зимний пожароопасный период сопровождается сложностями в эксплуатации пожарных систем [8]. По данным МЧС Якутии³, только с начала 2025 г. в республике зарегистрировано 136 техногенных пожаров, при которых погибло 8 человек. Из общего количества пожаров 90 произошли в жилом секторе. За зимний период (ноябрь, декабрь 2023 г. и январь 2024 г.) в жилых помещениях якутян произошло 230 пожаров⁴.

При установлении сильных морозов пожарные сталкиваются с трудностями при разборке рукавных линий, поскольку некоторые стандартные уплотнительные кольца теряют гибкость и растрескиваются. Это приводит к утечке воды, снижению давления в системе и увеличению времени тушения пожара [9, 10]. Для обеспечения надежности работы пожар-

ного оборудования в арктических условиях необходимы уплотнители, способные сохранять свою эластичность и работоспособность вплоть до -70°C .

Для решения проблемы несоответствия заявленных эксплуатационных характеристик уплотнительных колец авторами разработана рецептура морозостойкой резиновой смеси на основе бутадиенового каучука, содержащей активный наполнитель [11, 12] и противостарители [13, 14]. В данном исследовании рассматривается влияние разных комбинаций противостарителей.

Объекты и методы исследования

Объектами исследования в работе являются: морозостойкий бутадиеновый каучук марки СКД-В [15–17], противостарители нафтам-2, ацетонанил, IPPD.

Исследуемые смеси изготавливали в резиномесителе закрытого типа Plastograph EC Plus (Brabender, Германия) при следующих параметрах смешения: начальная температура -40°C , время смешения — 20 мин [11].

Рецептуры исследуемых резиновых смесей приведены в табл. 1.

В рамках работы для оценки физико-механических и температурных свойств исследуемых образцов использовали следующие методы исследования: упруго-прочностные свойства анализировали на универсальной разрывной установке Autograph AGS-JSTD (Shimadzu, Япония) в соот-

² О сухопутных территориях Арктической зоны Российской Федерации : Указ Президента РФ от 02.05.2014 № 296 (ред. от 13.05.2019) // Собрание законодательства РФ. 05.05.2014. № 18 (часть I). Ст. 2136.

³ 8 якутян погибли на пожарах в этом году. URL: <https://yakutia-daily.ru/s-nachala-zimy-v-yakutii-na-pozharah-pogibli-desyat-chelovek/>

⁴ С начала зимы в Якутии на пожарах погибли десять человек. URL: <https://yakutia-daily.ru/s-nachala-zimy-v-yakutii-na-pozharah-pogibli-desyat-chelovek/>

Таблица 1. Рецепттура резиновой смеси на основе бутадиенового каучука СКД-В с различными противостарителями
Table 1. Formulation of the rubber compound based on SKD-V butadien.rubber with various

Ингредиенты Ingredients	Мас. ч. Phr							
	1	2	3	4	5	6	7	8
СКД-В SKD-V	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0
Стеариновая кислота Stearic acid	2,0	2,0	2,0	2,0	2,0	2,0	2,0	2,0
Сульфенамид Ц Sulfenamide C	0,9	0,9	0,9	0,9	0,9	0,9	0,9	0,9
Оксид цинка Zinc oxide	3,0	3,0	3,0	3,0	3,0	3,0	3,0	3,0
Сера Sulfur	1,5	1,5	1,5	1,5	1,5	1,5	1,5	1,5
Технический углерод П803 Carbon Black P803	120,0	120,0	120,0	120,0	120,0	120,0	120,0	120,0
Ацетонанил Acetonanil	–	0,5	–	–	0,5	0,5	–	0,5
Нафтам-2 Naftam-2	–	–	0,5	–	0,5	–	0,5	0,5
IPPD	–	–	–	0,5	–	0,5	0,5	0,5

ветствии с ISO 37–2020⁵. Износостойкость материалов определяли на испытательной машине МИ-2 («Полимермаш Групп», Россия) в соответствии с ISO 4649–1985⁶. Для оценки устойчивости к воде образцы выдерживали в ней при комнатной температуре в течение 72 ч, твердость по Шору А измеряли согласно ISO 7619-1–2009⁷, остаточную деформацию сжатия в соответствии с ISO 815-1–2017⁸. Термическое старение проводили в лабораторной сушильной камере при 100 °С в течение 72 ч (ISO 188–2013). Температурные исследования включали определение: температуры стеклования с использованием дифференциального сканирующего калориметра DSC 204 F1 Phoenix (NETZSCH, Германия), температурного предела хрупкости тестером хрупкости UWP-091 (UPWELL, Китай). Температурные фазовые переходы образцов изучали на термомеханическом анализаторе TMA-60/60H (Shimadzu, Япония). Микроструктуру низкотемпературных

сколов исследовали на сканирующем электронном микроскопе JSM-7800F (JEOL, Япония).

Результаты и их обсуждение

Результаты полученных физико-механических свойств представлены в табл. 2.

Как видно из табл. 2, при добавлении противостарителей незначительно увеличиваются упруго-прочностные свойства эластомеров относительно исходной смеси. Наибольшими показателями относительного удлинения при разрыве обладают образцы с комбинацией противостарителей нафтам-2 + IPPD и ацетонанил + нафтам-2 + IPPD — 189 %. Также увеличивается условная прочность при разрыве на 11 % относительно исходной смеси, она находится в диапазоне от 11,1 до 11,5 МПа. Введение противостарителей практически не влияет на твердость по Шору А, плотность, износостойкость.

В результате испытаний установлено, что все противостарители, кроме ацетонанила, увеличивают степень набухания резин в водной среде. Зарегистрировано, что введение IPPD (рис. 2) как самостоятельно, так и в комбинации с другими противостарителями приводит к окрашиванию воды в желтый цвет. Окрашивание воды при использовании IPPD указывает на миграцию противостарителя из эластомера. Это явление возникает, предположительно, из-за недостаточной совместимости IPPD с полимерной матрицей, что приводит к его вымыванию [18]. Данный эффект критичен для изделий, применяемых в контакте

⁵ ГОСТ ISO 37–2020. Резина и термоэластопласты. Определение упругопрочностных свойств при растяжении.

⁶ ISO 4649:1985. Резина. Определение стойкости к истиранию с использованием вращающегося цилиндрического барабанного устройства.

⁷ ГОСТ Р ИСО 7619-1–2009. Резина вулканизованная или термопластичная. Определение твердости при вдавливании. Часть 1. Метод с применением дюрометра (твердость по Шору).

⁸ ГОСТ Р ИСО 815-1–2017. Национальный стандарт Российской Федерации. Резина и термоэластопласты. Определение остаточной деформации при сжатии. Часть 1. Испытания при стандартной или повышенной температурах.

Таблица 2. Физико-механические свойства эластомеров на основе каучука СКД-В в зависимости от применяемого противостарителя**Table 2.** Physico-mechanical properties of elastomers based on SKD-rubber depending on the applied antioxidants

Свойства Properties	Рецептуры Formulations							
	1	2	3	4	5	6	7	8
	Свойства вулканизатов Vulcanizate properties							
ϵ_p , %	169	182	174	171	179	181	189	189
f_p , МПа f_p , МПа	10,3	11,2	11,4	11,2	11,5	11,1	11,3	11,1
$f_{100\%}$, МПа $f_{100\%}$, МПа	7,1	7,3	7,8	7,8	7,8	7,4	7,4	7,3
H , Шор А H , Shore A	82	83	82	82	81	82	81	81
ρ , г/см ³ ρ , g/cm ³	1,27	1,27	1,27	1,27	1,26	1,27	1,27	1,26
ΔQ (вода), % ΔQ (water), %	0,84	0,56	1,16	1,41	1,01	1,00	1,09	0,96
ΔV , см ³ ΔV , cm ³	0,13	0,10	0,09	0,10	0,15	0,15	0,14	0,18
После термической обработки After heat treatment								
ϵ_p , %	84	79	99	95	111	123	122	113
f_p , МПа f_p , МПа	10,1	9,4	10,0	10,4	10,7	11,3	11,2	10,3
$f_{100\%}$, МПа $f_{100\%}$, МПа	—	—	—	—	10,1	9,9	9,8	9,5
H , Шор А H , Shore A	86	86	85,2	87	86	86	87	86
ρ , г/см ³ ρ , g/cm ³	1,26	1,26	1,26	1,26	1,26	1,26	1,26	1,26
ОДС, % CS, %	75,24	64,44	66,45	81,91	66,5	66,61	64,42	68,24

Примечание: ϵ_p — относительное удлинение при разрыве, %; f_p — условная прочность при разрыве, МПа; $f_{100\%}$ — условное напряжение при удлинении на 100%, МПа; H — твердость по Шору А, Шор А; ρ — плотность, г/см³; ΔQ (вода) — степень набухания в воде, %; ΔV — объемное истирание, см³; ОДС — остаточное деформационное сжатие, %.

Note: ϵ_p — relative elongation at break, %; f_p — tensile strength, МПа; $f_{100\%}$ — tensile stress at 100% elongation, МПа; H — Shore A hardness, Shore A; ρ — density, g/cm³; ΔQ (water) — degree of swelling in water, %; ΔV — volume abrasion, cm³; CS — compression set, %.

**Рис. 2.** Образцы после выдержки в воде**Fig. 2.** Specimens after soaking in water

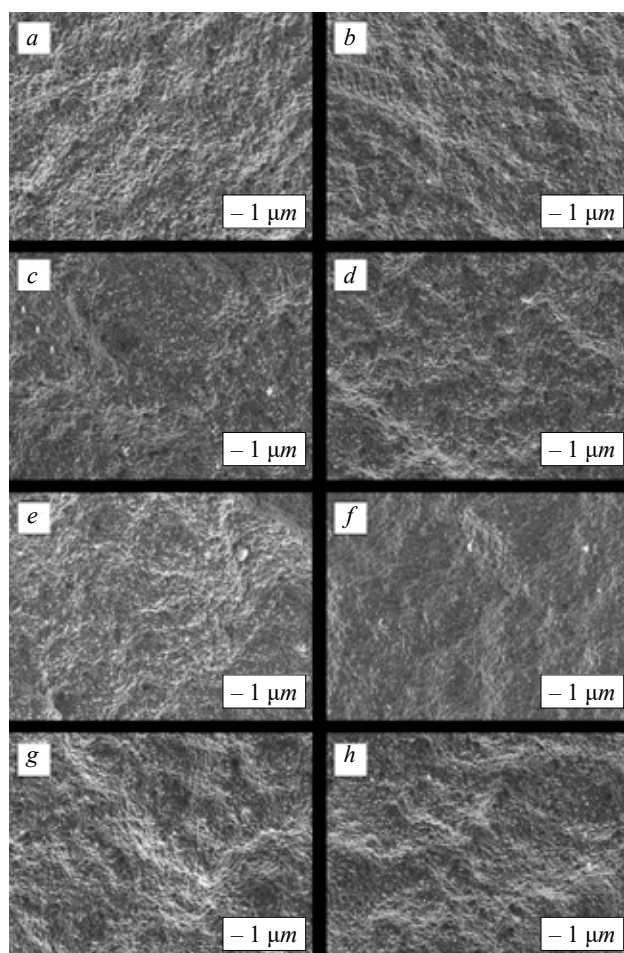


Рис. 3. Микрофотографии поверхности низкотемпературного скола эластомеров в зависимости от противостарителей: *a* — исходный; *b* — ацетонанил; *c* — нафтам-2; *d* — IPPD; *e* — ацетонанил + нафтам-2; *f* — ацетонанил + IPPD; *g* — нафтам-2 + IPPD; *h* — ацетонанил + IPPD + нафтам-2

Таблица 3. Температурные свойства исследуемых эластомеров
Table 3. Thermal properties of the studied elastomers

Свойства Properties	Рецептуры Formulations							
	1	2	3	4	5	6	7	8
$T_{\text{стек}}, ^\circ\text{C}$ $T_{g,t}, ^\circ\text{C}$	-82,8	-82,7	-87,3	-86,2	-87,7	-87,7	-86,9	-90,6
$T_{\text{ф.п}}, ^\circ\text{C}$ $T_{f,p}, ^\circ\text{C}$	-80,6	-73,6	-76,1	-76,1	-73,9	-77,4	-77,1	-83,4
$T_{\text{п.х}}, ^\circ\text{C}$ $T_{b,p}, ^\circ\text{C}$	< -70	< -70	< -70	< -70	< -70	< -70	< -70	< -70

Примечание: $T_{\text{стек}}$ — температура стеклования, $^\circ\text{C}$; $T_{\text{ф.п}}$ — температура фазового перехода, $^\circ\text{C}$; $T_{\text{п.х}}$ — температурный предел хрупкости, $^\circ\text{C}$.

Note: $T_{g,t}$ — glass transition temperature, $^\circ\text{C}$; $T_{f,t}$ — phase transition temperature, $^\circ\text{C}$; $T_{b,t}$ — brittleness temperature limit, $^\circ\text{C}$.

с водой, так как это может снижать долговечность за счет вымывания противостарителя из материала.

Исследования свойств эластомеров после термического старения показали снижение относительного удлинения у образцов на 32–56 % в зависимости от используемых противостарителей, у исходного образца снижение составило 50 %. При добавлении противостарителей по отдельности стойкость к старению уменьшается, однако при добавлении их комбинаций происходит ее увеличение. Это указывает на более эффективную защиту эластомеров. Твердость стала выше на 3–6 Шор А, плотность после старения осталась без изменений. Условное напряжение при удлинении на 100 % после старения зафиксировалось только при использовании комбинации противостарителей (рецептуры 5–8). Снижение свойств после старения связано с деструктивными процессами в полимерной матрице, вызванными термоокислительной деградацией [19]. Однако комбинация противостарителей продемонстрировала более высокую стойкость к старению по сравнению с их отдельным применением, предположительно, за счет их синергетического эффекта, что минимизирует потерю эластичности и прочности при термическом старении.

На рис. 3 представлены микрофотографии структуры низкотемпературного скола исследуемых эластомеров на основе СКД-В с содержанием различных комбинаций противостарителей.

Как видно из полученных микроснимков, противостарители не влияют на структуру поверхности эластомера. Во всех исследуемых образцах наблюдается общее равномерное распределение ингредиентов в объеме матрицы, что говорит о том, что введение противостарителей не нарушает гомогенность эластомерной матрицы [20]. Единичные агломерации наблюдаются на рисунках *c*, *e*, *f*, которые, предположительно, являются оксидом цинка.



Рис. 4. Внедрение уплотнительных колец
Fig. 4. Implementation of sealing rings

Отсутствие видимых дефектов на поверхности сколов согласуется с близкими значениями твердости по Шору А и условного напряжения, так как макро-структура материала сохраняет свою целостность.

В табл. 3 приведены температурные свойства исследуемых эластомеров в зависимости от введенных противостарителей.

На основании полученных данных из табл. 3 видно, что при введении противостарителей происходит снижение температуры стеклования относительно исходного образца, это может быть связано с увеличением подвижности полимерных цепей за счет введения дополнительного компонента (противостарителя).

Температура фазового перехода находится в диапазоне от $-83,4^{\circ}\text{C}$ до $-73,6^{\circ}\text{C}$, таким образом материал способен сохранять способность к обратимой деформации и эластичность даже в условиях экстремального холода (-70°C), что критически важно для эксплуатации в арктических и субарктических регионах. Данные свойства обеспечивают надежность уплотнительных элементов и сохранение герметичности соединений в условиях Арктики.

Температурный предел хрупкости для всех образцов ниже -70°C , это значит, что данные резиновые смеси соответствуют требованиям климатического исполнения УХЛ-1 и способны работать при температурах до -70°C .

Также авторами были проведены натурные испытания, образцы вынесли на улицу в январе 2025 г. в г. Якутске при температуре окружающей среды -51°C и оставили на 2 ч. В ходе эксперимента установлено, что образцы полностью сохраняют эластичность при данной температуре, что подтверждает их

способность обеспечивать герметичность соединения в условиях экстремальных температур.

На основе разработанной рецептуры резиновой смеси были изготовлены уплотнительные кольца (рис. 4). Опытные образцы колец КН-50, КН-70 и КН-80 были переданы в декабре 2021 г. в части МЧС по Республике Саха (Якутия) и в АО «Водоканал» для испытаний в реальных условиях эксплуатации. По итогам испытаний были получены положительные отзывы от 5 ПСО ФПС ГПС МЧС России по РС(Я) и АО «Водоканал» в 2022 г.

Заключение

В ходе проведенного исследования разработана рецептура морозостойких уплотнительных колец на основе бутадиенового каучука СКД-В, в качестве противостарителей была выбрана комбинация противостарителей ацетонанил и нафтам-2. Анализ физико-механических, термических и эксплуатационных свойств полученных эластомеров позволил определить оптимальный состав резиновой смеси для использования в качестве уплотнителей для пожарных рукавов и гидрантов.

По итогам исследования можно сделать следующие выводы:

- добавление противостарителей улучшает эластичность и прочностные характеристики резины, снижая температуру стеклования и повышая устойчивость к механическим нагрузкам при низких температурах;
- при добавлении IPPD в резиновую смесь происходит его вымывание из матрицы, о чем свидетельствует окрашивание воды в желтый цвет;
- все исследуемые образцы продемонстрировали температурный предел хрупкости ниже -70°C , что подтверждает их соответствие требованиям климатического исполнения УХЛ-1 и возможность эксплуатации в арктических регионах;
- физико-механические и температурные свойства показали, что комбинации противостарителей (ацетонанил + нафтам-2) обеспечивают наилучшие прочностные характеристики и минимальную миграцию компонентов;
- натурные испытания при температуре -51°C подтвердили сохранение эластичности образцов, что свидетельствует об их высокой работоспособности в реальных условиях эксплуатации;
- опытные образцы уплотнительных колец успешно протестированы в подразделениях МЧС Якутии, получены положительные отзывы о надежности изделий;
- осуществлен трансфер наукоемкой технологии по разработке уплотнительных колец до практического испытания на базе МЧС по Республике Саха (Якутия) и АО «Водоканал».

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Petrova N.N., Portnyagina V.V., Mukhin V.V., Kyzmina E.S. Problems of operation of elastomer materials in the arctic region // *KnE Materials Science*. 2016. No. 1 (1). Pp. 129–134. DOI: 10.18502/kms.v1i1.574
2. Ищенко А.Д., Таранцев А.А., Шидловский А.Л. Об особенностях действий по тушению пожара в условиях Арктики // *Проблемы управления рисками в техносфере*. 2020. № 3 (55). С. 16–20. EDN KJIGOH.
3. Petrova N.N., Portnyagina V.V., Mukhin V.V., Shim E.L., Cho J-H. Preparation and improved physical characteristics of propylene oxid.rubber composites // *Molecules*. 2018. No. 23 (9). P. 2150. DOI: 10.3390/molecules23092150
4. Mukhin V.V., Petrova N.N., Portnyagina V.V., Fedorov A.L., Baisheva A.V. Investigation of the plasticizer content effects on the operability of the epichlorohydri.rubber based elastomeric material during full-scale test under cold climate conditions and hydrocarbon medium influence // *Materials Science Forum*. 2019. No. 945. Pp. 417–421. DOI: 10.4028/www.scientific.net/MSF.945.417
5. Wu S., Xiao F., Chen Q., Liu Y., Guo B. Low temperature sealing behavior evaluation of elastomers in aircraft hydraulic systems // *Rubber Chemistry and Technology*. 2024. No. 97 (1). Pp. 44–58. DOI: 10.5254/rct.23.76992
6. Wu L., Liao S., Wang Y. Cold-Resistant Rubbers Based on Flexible Polymer Chains // *Chinese Journal of Chemistry*. 2023. No. 41 (17). Pp. 2197–2205. DOI: 10.1002/cjoc.202300078
7. Wang X., Zhang Y., Ren Sh., Xu Z., Li K., Hao X. et al. Effect of zinc oxide/layered double hydroxide on the mechanics of silicon.rubber at low temperature // *European Polymer Journal*. 2023. No. 200. P. 112478. DOI: 10.1016/j.eurpolymj.2023.112478
8. Алешков М.В. Особенности тушения крупных пожаров на территории Российской Федерации при внешнем воздействии опасных природных явлений // *Пожаровзрывобезопасность/Fire and explosion safety*. 2013. № 22 (5). С. 59–64. EDN QIYYVL.
9. Караманчук Е.А., Коноваленко П.Н., Багажков И.В. Развертывание сил и средств в условиях низких температур // *Совершенствование форм и методов проведения мероприятий, направленных на защиту населения и территорий от возможных ЧС природного и техногенного характера в Арктической зоне Республики Коми* : сб. мат. Всеросс. круглого стола. Усинск : Ивановская пожарно-спасательная академия ГПС МЧС России, 2023. С. 23–25. EDN MHAFRZ.
10. Пивкин А.С. Обзор пожарного автомобиля для условий Крайнего Севера АЦ-СОР 2,0-20 на базе шасси КамАЗ «Гефест» и его аналога // *Актуальные проблемы безопасности в техносфере*. 2022. № 1 (5). С. 12–16. DOI: 10.34987/2712-9233.2022.83.91.002
11. Макаров И.С., Дьяконов А.А., Спиридонов А.М., Стручкова Т.С., Охлопкова А.А., Петрова Н.Н. и др. Влияние содержания технического углерода на свойства бутадиенового эластомера // *Журнал Сибирского федерального университета. Техника и технологии*. 2023. № 16 (8). С. 977–985. EDN INBBYP.
12. Kaliyathan A.V., Rane A.V., Huskic M., Kunaver M., Kalarikkal N., Rouxel D. et al. Carbon black distribution in natura.rubber/butadien.rubber blend composites: Distribution driven by morphology // *Composites Science and Technology*. 2020. No. 200. P. 108484. DOI: 10.1016/j.compscitech.2020.108484
13. Макаров И.С. Исследование влияния противостарителей на свойства бутадиенового эластомера // *Аммосов-2023* : сб. мат. общенунивер. науч. конф. студентов и магистрантов. Якутск, 2023. С. 719–722. EDN GXXAER.
14. Zhao W., He J., Yu P., Jiang X., Zhang L. Recent progress in the rubber antioxidants : a review // *Polymer Degradation and Stability*. 2023. No. 207. P. 110223. DOI: 10.1016/j.polymdegradstab.2022.110223
15. Золотарев В.Л., Ковалева Л.А. «Титановый» каучук СКД: 1964–2014 // *Промышленное производство и использование эластомеров*. 2014. № 4. С. 3–4. EDN TILLJL.
16. Елисеев О.А., Чайкун А.М., Бузник В.М., Соколова М.Д., Попов С.Н. Основные принципы построения рецептур морозостойких резин для изделий, эксплуатируемых в условиях арктического климата // *Перспективные материалы*. 2015. № 11. С. 5–18. EDN UXFYSL.
17. Чайкун А.М., Елисеев О.А., Наумов И.С., Венедиктова М.А. Особенности морозостойких резин на основе различных каучуков // *Труды ВИАМ*. 2013. № 12. С. 4. EDN RPZGNN.
18. Пучков А.Ф., Спиридонова М.П., Лапин С.В., Киба А.А. Особенности абразивного износа резин, содержащих комплексный противостаритель ПРС-1N // *Каучук и резина*. 2016. № 4. С. 16–19. EDN WJXSXT.
19. Мухомудинов Э.А., Дьяконов Г.С. Физико-химические основы ослабления старения резин на примере комплексных ингибиторов // *Вестник Казанского технологического университета*. 2010. № 10. С. 483–504. EDN NBOQYB.
20. Ершов Д.В., Редькин В.Е., Иваненко А.А., Науменко Л.С., Лапковская Е.Ю., Ткачев А.Г. Получение и исследование свойств эластомеров, модифицированных ультрадисперсными (нано) частицами // *Каучук и резина*. 2011. № 4. С. 19–22. EDN SAXRSX.

REFERENCES

1. Petrova N.N., Portnyagina V.V., Mukhin V.V., Kyzmina E.S. Problems of operation of elastomer materials in the arctic region. *KnE Materials Science*. 2016; 1(1):129-134. DOI: 10.18502/kms.v1i1.574
2. Ishchenko A.D., Tarantsev A.A., Shidlovsky A.L. About the features of fire extinguishing actions in arctic conditions. *Problems of technosphere risk management*. 2020; 3(55):16-20. EDN KJIGOH. (rus).
3. Petrova N.N., Portnyagina V.V., Mukhin V.V., Shim E.L., Cho J-H. Preparation and improved physical characteristics of propylene oxide rubber composites. *Molecules*. 2018; 23(9):2150. DOI: 10.3390/molecules23092150
4. Mukhin V.V., Petrova N.N., Portnyagina V.V., Fedorov A.L., Baisheva A.V. Investigation of the plasticizer content effects on the operability of the epichlorohydrin rubber based elastomeric material during full-scale test under cold climate conditions and hydrocarbon medium influence. *Materials Science Forum*. 2019; 945:417-421. DOI: 10.4028/www.scientific.net/MSF.945.417
5. Wu S., Xiao F., Chen Q., Liu Y., Guo B. Low temperature sealing behavior evaluation of elastomers in aircraft hydraulic systems. *Rubber Chemistry and Technology*. 2024; 97(1):44-58. DOI: 10.5254/rct.23.76992
6. Wu L., Liao S., Wang Y. Cold-Resistant Rubbers Based on Flexible Polymer Chains. *Chinese Journal of Chemistry*. 2023; 41(17):2197-2205. DOI: 10.1002/cjoc.202300078
7. Wang X., Zhang Y., Ren Sh., Xu Z., Li K., Hao X. et al. Effect of zinc oxide/layered double hydroxide on the mechanics of silicon rubber at low temperature. *European Polymer Journal*. 2023; 200:112478. DOI: 10.1016/j.eurpolymj.2023.112478
8. Aleshkov M.V. Peculiarities of extinguishing large-scale fires on the territory of the Russian Federation under the external effect of hazardous natural phenomena. *Pozharovzryvobezopasnost'/Fire and Explosion Safety*. 2013; 22(5):59-64. EDN QIYYVL. (rus).
9. Karamanchuk E.A., Konovalenko P.N., Bagazhkov I.V. Deployment of forces and means under low temperature conditions. *Improving the forms and methods of carrying out events aimed at protecting the population and territories from possible natural and man-made emergencies in the Arctic zone of the Komi Republic : collection of materials from the All-Russian round table*. Usinsk, Ivanovo Fire and Rescue Academy of the Ministry of Emergency Situations of Russia, 2023; 23-25. EDN MHAFRZ. (rus).
10. Pivkin A.S. Overview of a fire truck for the conditions of the Far North AC-SOR 2.0-20 based on the KAMAZ "Gefest" chassis and its analog. *Actual problems of safety in the technosphere*. 2022; 1(5):12-16. DOI: 10.34987/2712-9233.2022.83.91.002 (rus).
11. Makarov I.S., Dyakonov A.A., Spiridonov A.M., Struchkova T.S., Okhlopova A.A., Petrova N.N. et al. Influence of carbon black content on the properties of butadiene. *Engineering & Technologies. Journal of Siberian Federal University*. 2023; 16(8):977-985. EDN INBBYP (rus).
12. Kaliyathan A.V., Rane A.V., Huskic M., Kunaver M., Kalarikkal N., Rouxel D. et al. Carbon black distribution in natural rubber/butadiene rubber blend composites: Distribution driven by morphology. *Composites Science and Technology*. 2020; 200:108484. DOI: 10.1016/j.compscitech.2020.108484
13. Makarov I.S. Study of the influence of antioxidants on the properties of butadiene elastomer. *Ammosov-2023 : collection of materials of the all-university scientific conference of students and masters*. Yakutsk, 2023; 719-722. EDN GXXAER (rus).
14. Zhao W., He J., Yu P., Jiang X., Zhang L. Recent progress in the rubber antioxidants : a review. *Polymer Degradation and Stability*. 2023; 207:110223. DOI: 10.1016/j.polymdegradstab.2022.110223
15. Zolotarev V.L., Kovaleva L.A. "Titanium" butadiene rubber: 1964–2014. *Industrial Production and Use of Elastomers*. 2014; 4:3-4. EDN TILLJL. (rus).
16. Eliseev O.A., Chaikun A.M., Buznik V.M., Sokolova M.D., Popov S.N. The basic principles of creation of formula cold-resistant rubbers stock for the products maintained in the condition of the Arctic climate. *Prospective Materials*. 2015; 11:5-18. EDN UXFYSJ. (rus).
17. Chaikun A.M., Eliseev O.A., Naumov I.S., Venediktova M.A. Features of cold-resistant curin rubber compounds on the basis of different rubbers. *Proceeding of VIAM*. 2013; 12:4. EDN RPZGNN (rus).
18. Puchkov A.F., Spiridonova M.P., Lapin S.V., Kiba A.A. Some features of abrasive wear of rubbers containing complex antioxidant PRS-1N. *Rubber and Rubber Products*. 2016; 4:16-19. EDN WJXSXT. (rus).
19. Mukhutdinov E.A., Dyakonov G.S. Physicochemical principles of reducing rubber aging using complex inhibitors as an example. *Herald of Technological University*. 2010; 10:483-504. EDN NBOQYB. (rus).
20. Ershov D.V., Redkin V.E., Ivanenko A.A., Naumenko L.S., Lapkovskaya E.Yu., Tkachev A.G. Obtaining and studying the properties of elastomers modified with ultra-dispersed (nano) particles. *Rubber and Rubber Products*. 2011; 4:19-22. EDN SAXRSX. (rus).

Поступила 27.03.2025, после доработки 13.05.2025;

принята к публикации 26.05.2025

Received March 27, 2025; Received in revised form May 13, 2025;

Accepted May 26, 2025

Информация об авторах

МАКАРОВ Игорь Сергеевич, аспирант, Северо-Восточный федеральный университет им. М.К. Аммосова, Россия, 677013, г. Якутск, ул. Белинского, 58; ORCID: 0000-0002-2794-1164; e-mail: misergeevich@mail.ru

ДЬЯКОНОВ Афанасий Алексеевич, к.т.н., старший научный сотрудник, Северо-Восточный федеральный университет им. М.К. Аммосова, Россия, 677013, г. Якутск, ул. Белинского, 58; научный сотрудник, Институт физико-технических проблем Севера им. В.П. Ларионова Сибирского отделения Российской академии наук, Россия, 677000, г. Якутск, ул. Октябрьская, 1; ResearcherID: LTF-2325-2024; AuthorID: 745234; ORCID: 0000-0002-6959-368X; e-mail: afonya71185@mail.ru

ЛАЗАРЕВА Надежда Николаевна, к.т.н., ведущий научный сотрудник, заведующая УНТЛ «Технологии полимерных нанокompозитов» имени доцента С.А. Слепцовой, Северо-Восточный федеральный университет им. М.К. Аммосова, Россия, 677013, г. Якутск, ул. Белинского, 58; ResearcherID: E-5063-2014; AuthorID: 730168; ORCID: 0000-0001-5090-0793; e-mail: lazareva-nadia92@mail.ru

СИНЯКОВ Алексей Александрович, старший лейтенант внутренней службы, помощник начальника дежурной смены службы пожаротушения 5 пожарно-спасательного отряда, Федеральная противопожарная служба Государственной противопожарной службы Главного управления МЧС России по Республике Саха (Якутия), Россия, 677009, г. Якутск, ул. Дзержинского, 35а; ORCID: 0009-0007-5432-8166; e-mail: sinyakov87@mail.ru

ПАРЕНКО Евгений Геннадьевич, заместитель главного инженера, АО «Водоканал», Россия, 677001, г. Якутск, ул. Богдана Чижика, 19; ORCID: 0009-0000-0425-2377; e-mail: parenkoeg@mail.ru

Вклад авторов:

Макаров И.С. — создание образцов для исследований; проведение опытов; участие в апробации полученных результатов; формирование выводов; написание исходного текста и доработка текста статьи.

Дьяконов А.А. — научное руководство; концепция исследования; участие в апробации полученных результатов; формирование выводов; доработка текста статьи.

Лазарева Н.Н. — научное консультирование; формирование выводов; доработка текста статьи.

Синяков А.А. — проведение опытных испытаний уплотнительных колец на базе 5-го пожарно-спасательного отряда ФПС ГПС Главного управления МЧС России по Республике Саха (Якутия); формирование выводов.

Паренко Е.Г. — проведение опытных испытаний уплотнительных колец на базе АО «Водоканал»; формирование выводов.

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Information about the authors

Igor S. MAKAROV, Postgraduate student, North-Eastern Federal University named after M.K. Ammosova, Belinskogo St., 58, Yakutsk, 677013, Russian Federation; ORCID: 0000-0002-2794-1164; e-mail: misergeevich@mail.ru

Afanasii A. DYAKONOV, Cand. Sci. (Eng.), Senior Researcher, North-Eastern Federal University named after M.K. Ammosova, Belinskogo St., 58, Yakutsk, 677013, Russian Federation; Researcher, Institute of Physical and Technical Problems of the North named after V.P. Larionov of the Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences, Oktyabrskaya St., 1, Yakutsk, 677000, Russian Federation; ResearcherID: LTF-2325-2024; AuthorID: 745234; ORCID: 0000-0002-6959-368X; e-mail: afonya71185@mail.ru

Nadezhda N. LAZAREVA, Cand. Sci. (Eng.), Leading Researcher, Head of the Research and Educational Laboratory “Polymer Nanocomposite Technologies” named after Associate Professor S.A. Sleptsova, North-Eastern Federal University named after M.K. Ammosova, Belinskogo St., 58, Yakutsk, 677013, Russian Federation; ResearcherID: E-5063-2014; AuthorID: 730168; ORCID: 0000-0001-5090-0793; e-mail: lazareva-nadia92@mail.ru

Alexey A. SINYAKOV, Senior Lieutenant of the Internal Service, Assistant Chief of the Duty Shift of the Firefighting Service, 5th Fire and Rescue Unit, Federal Fire Service of the State Fire Service Main Directorate of the Ministry of Emergency Situations of Russia for the Republic of Sakha (Yakutia), Dzerzhinsky St., 35a, Yakutsk, 677000, Russian Federation; ORCID: 0009-0007-5432-8166; e-mail: sinyakov87@mail.ru

Evgeny G. PARENKO, Deputy Chief Engineer, JSC “Vodokanal”, Bogdana Chizhika St., 19, Yakutsk, 677001, Russian Federation; ORCID: 0009-0000-0425-2377; e-mail: parenkoeg@mail.ru

Contribution of the authors:

Makarov I.S. — creation of samples for research; conducting experiments; participation in the approbation of the results; formation of conclusions; writing the source text and finalizing the text of the article.

Dyakonov A.A. — scientific guidance; research concept; participation in the approbation of the results; formation of conclusions; revision of the text of the article.

Lazareva N.N. — scientific consulting; formation of conclusions; revision of the text of the article.

Sinyakov A.A. — conducting pilot tests of sealing rings on the basis of the 5th fire and rescue squad of the FPS GPS of the Main Directorate of the Ministry of Emergency Situations of Russia in the Republic of Sakha (Yakutia); formation of conclusions.

Parentko E.G. — conducting pilot tests of sealing rings on the basis of JSC Vodokanal; formation of conclusions. The authors declare no conflicts of interests.

Динамические механические свойства пластифицированных поливинилхлоридных композиций, наполненных силикатами

Диляра Фанисовна Садыкова¹, Елена Михайловна Готлиб², Алла Германовна Соколова³✉

¹ Саратовский государственный технический университет имени Гагарина, г. Саратов, Россия

² Казанский национальный исследовательский технологический университет, г. Казань, Россия

³ Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет, г. Москва, Россия

АННОТАЦИЯ

Введение. Пластифицированные композиции на основе поливинилхлорида (ПВХ) используются фактически во всех отраслях народного хозяйства и наиболее часто их наполняют силикатами. Перспективным наполнителем ПВХ является также волластонит, игольчатая форма частиц которого обеспечивает его армирующий эффект. Эксплуатационные свойства композиционных полимерных материалов напрямую зависят от их релаксационных свойств.

Цель. Изучение зависимости молекулярной подвижности цепей в ПВХ-композициях от их фазового состава и структуры наполнителей-силикатов для выявления связи между релаксационными и эксплуатационными свойствами полимерных композитов.

Материалы и методы. В работе были исследованы пластифицированные поливинилхлоридные композиции на основе эмульсионного поливинилхлорида, пластификатора ЭДОС, стандартных наполнителей микромармара и Аэросила и модификаторов на основе золы рисовой шелухи. Для исследования был использован динамический механический метод, а также стандартные методики для определения объема и размера пор применяемых наполнителей.

Результаты и обсуждение. Результаты исследования показали, что для всех изученных модифицированных композиций, не зависимо от вида наполнителя, зафиксирован один максимум температурных зависимостей тангенса угла механических потерь, который соответствует переходу полимера из стеклообразного в высокоэластическое состояние. Также сдвиг релаксационного перехода наблюдается в область более высоких температур для всех исследованных наполненных композиций, что подтверждается данными по изменению температуры стеклования ПВХ. Наибольший эффект обеспечивает волластонит с развитой кристаллической структурой, уменьшающий интенсивность тангенса угла механических потерь в области основного максимума. Промышленный наполнитель Аэросил способствует снижению динамического модуля ПВХ композиций.

Выводы. Было установлено, что обработка поверхности золы рисовой шелухи (ЗРШ) четвертичными аммониевыми солями приводит к снижению температуры стеклования ПВХ композиций ввиду уменьшения пористости золы при активации. При наполнении активированной ЗРШ ширина максимума тангенса угла механических потерь уменьшается, что указывает на повышение однородности модифицированного материала.

Ключевые слова: зола рисовой шелухи; эмульсионный поливинилхлорид; ПВХ композиции; пластификатор ЭДОС; Аэросил; волластонит; пористость; четвертичные аммонийные соли; тангенс угла механических потерь; динамический модуль

Для цитирования: Садыкова Д.Ф., Готлиб Е.М., Соколова А.Г. Динамические механические свойства пластифицированных поливинилхлоридных композиций, наполненных силикатами // Пожаровзрывобезопасность/ Fire and Explosion Safety. 2025. Т. 34. № 3. С. 50–58. DOI: 10.22227/0869-7493.2025.34.03.50-58

✉ Соколова Алла Германовна, e-mail: as.falconi@yandex.ru

Dynamic mechanical properties of plasticized polyvinylchloride composites filled with silicates

Dilyara F. Sadykova¹, Elena M. Gotlib², Alla G. Sokolova³✉

¹ Yuri Gagarin State Technical University of Saratov, Saratov, Russian Federation

² Kazan National Research Technological University, Kazan, Russian Federation

³ National Research Moscow State University of Civil Engineering, Moscow, Russian Federation

ABSTRACT

Introduction. Plasticized compositions based on polyvinyl chloride (PVC) are used in virtually all sectors of the economy and are most often filled with silicates. A promising PVC filler is also wollastonite, whose needle-shaped particles provide its reinforcing effect. The performance properties of composite polymer materials directly depend on their relaxation properties.

The aim. To study the dependence of molecular mobility of chains in PVC composites on their phase composition and structure of filler-silicates to reveal the relationship between relaxation and performance properties of polymer composites.

Materials and methods. In the current work, plasticized PVC compositions on the base of emulsion PVC, plasticizer EDOS, conventional fillers micro marble and Aerosil, and modifiers on the base of rice husk ash were filled. Dynamic mechanical method was used for the research as well as standard methods for assessing pores' volume and size of applied fillers.

Results and discussion. The results of study showed that for both basic PVC composition and modified by silicon dioxide derived from rice husk ash (RHA) and synthetic wollastonite (SW) on its base, one maximum is observed corresponding to transition from glassy to highly elastic state. Regardless of the filler's type, the shift of the relaxation transition occurs in the area of more elevated temperatures that correlates to the data on glass transition temperature of the polymer. The most prominent effect is provided by wollastonite with the developed crystalline structure, lowering the intensity of mechanical loss angle tangent in the region of the main maximum. The industrial filler Aerosil reduces the value of dynamic modulus of PVC compositions.

Conclusions. It was stated that treatment of rice husk ash surface with quaternary ammonium salts leads to lowering the glass transition temperature of PVC compositions due to decrease in ash porosity at activation. When the composition is filled with activated RHA, the width of the maximum of the tangent angle maximum of mechanical losses is reduced that demonstrates an increase in homogeneity of the modified material.

Keywords: rice husk ash; emulsion polyvinyl chloride; PVC compositions; EDOS plasticizer; Aerosil; wollastonite; porosity; quaternary ammonium salts; tangent of angle of mechanical loss; dynamic modulus

For citation: Sadykova D.F., Gotlib E.M., Sokolova A.G. Dynamic mechanical properties of plasticized polyvinylchloride composites filled with silicates. *Pozharovzryvobezopasnost/Fire and Explosion Safety*. 2025; 34(3):50-58. DOI: 10.22227/0869-7493.2025.34.03.50-58 (rus).

✉ Alla Germanovna Sokolova, e-mail: as.falconi@yandex.ru

Введение

Благодаря своим уникальным свойствам пластифицированные поливинилхлоридные композиции широко используются в различных отраслях народного хозяйства, строительстве, машиностроении, медицине, транспортной отрасли, электротехнике и др. Они обладают высокой устойчивостью к воздействию химических веществ, улучшенной механической прочностью, гибкостью и долговечностью. Широкое распространение поливинилхлоридных изделий во многом обусловлено их доступностью, сравнительно невысокой стоимостью поливинилхлорида (ПВХ) по сравнению с другими полимерами, а также неограниченными возможностями варьирования свойств композитных материалов на основе ПВХ [1].

Для улучшения эксплуатационных свойств полимерных материалов, в том числе и на основе поливинилхлорида, широко применяются силикаты природного и искусственного происхождения [2]. Свойства наполнителя играют важную роль в распределении его частиц в матрице. Однако производство кремнеземов из песка или ископаемого сырья требует энергоемких механических, физических, химических и термических операций, основанных на применении высоких температур и больших количеств кислот, которые в конечном итоге генерируют значительные объемы опасных химических отходов. Следует отметить, что ввиду кристаллической структуры природный диоксид кремния является менее реакционноспособным.

Промышленный аналог Аэросил получают методом осаждения или пирогенетическим путем. По своему составу он представляет собой мелкодисперсный диоксид кремния в аморфном состоянии, но является дорогостоящим наполнителем (его стоимость составляет около 3000 рублей за 1 кг).

В этой связи перспективными наполнителями полимерных композитов являются силикаты искусственного происхождения, среди которых особо выделяют недорогие побочные продукты сельскохозяйственного производства, например отходы рисо-переработки, содержащие до 98 % аморфного диоксида кремния [3]. Такие наполнители являются перспективными благодаря своим уникальным свойствам и экологической безопасности [4]. Учитывая высокий уровень применения кремнеземов, замена коммерческого синтетического диоксида кремния золой рисовой шелухи (ЗРШ), полученной путем переработки рисовой шелухи, в рецептуре ПВХ-композитов может принести явные экологические и экономические преимущества, снижая энергопотребление и производство жидких токсичных отходов.

Для наполнения ПВХ композиций эффективно использовать волластонит, игольчатая форма частиц которого обеспечивает армирующий эффект [5, 6]. Волластонит обладает высокой твердостью и прочностью, что делает его эффективным материалом для многих промышленных приложений. В качестве наполнителя применяется в основном природ-

ный волластонит отечественного производства двух марок — Воксил и Миволл. Благодаря своей форме кристаллы волластонита образуют вокруг себя ассоциаты пластифицированного ПВХ, что приводит к снижению усадки [7] и увеличению срока службы изделий из ПВХ-материалов. В настоящее время мировой объем производства волластонита составляет около 750 тыс. тонн в год, из которых 30 % приходится на долю синтетического волластонита (СВ).

По сравнению с природным волластонитом СВ характеризуется высокой степенью чистоты, однородностью химического состава и отсутствием включений других минералов, а также более низкой стоимостью, что расширяет сферы его применения [8, 9]. Синтетический волластонит — это синтетический минерал, который обладает высокой термической стабильностью, износостойкостью и электроизоляционными свойствами. Весьма перспективной для получения СВ является зола рисовой шелухи в качестве источника аморфного диоксида кремния. Ежегодно в мире образуется около 600 млн тонн отходов обмолота риса, загрязняющих окружающую среду. Ввиду наличия в составе ЗРШ порядка 16–18 % диоксида кремния она не распадается в земле, что делает ее переработку актуальной.

Целью данного исследования было изучить зависимость молекулярной подвижности цепей в ПВХ композициях от их фазового состава и структуры наполнителей-силикатов для выявления связи между релаксационными и эксплуатационными свойствами полимерных композитов. Для достижения данной цели исследования были поставлены следующие задачи:

- получить температурные зависимости тангенса угла механических потерь для базовой и модифицированных поливинилхлоридных композиций динамическим механическим методом и провести их анализ;
- изучить влияние модификаторов на изменение температуры стеклования поливинилхлоридных композиций;
- исследовать влияние пористости применяемых наполнителей на динамические механические свойства модифицированных композиций;
- изучить воздействие активации поверхности наполнителя четвертичными аммониевыми солями на значения динамического модуля ПВХ-композиций.

Материалы и методы исследования

За базовую рецептуру был принят следующий состав поливинилхлоридной композиции при массовом соотношении компонентов 1:1:2:

- поливинилхлорид эмульсионный ПВХ-Е-6250-Ж (ГОСТ 14039–78)¹;
- пластификатор ЭДОС, смесь производных 1,3-диоксана [10] (ТУ 2493-003-13004749–93)²;
- основной наполнитель микроаморф марки РМ-130 (ТУ 5716-001-99242323–2007)³.

В модифицированных композициях 5 мас. % основного наполнителя микроамора заменяли на равновесное количество силикатов: ЗРШ, полученную при 500 °С, ЗРШ, активированную [11] алкилбензилдиметиламмоний хлоридом С12-С14 КАТАПАВ 1214С.50 (ТУ 2482-003-04706205–2004)⁴, синтетическим волластонитом на основе ЗРШ, полученным при 900 °С (СВ) [12, 13] и промышленным аналогом Аэросилом (ГОСТ 14922-77)⁵, который был использован для проведения сравнительного анализа данных.

Объем и размер пор наполнителей определялся на анализаторе «Nova 1200e» по методу Барретта – Джойнера – Халенды (ВЖН), основанному на анализе адсорбции газов при разных давлениях и последующем расчете объема и размера пор на основе изотермы адсорбции-десорбции (ISO 15901-2)⁶. Для определения температуры стеклования использовали термомеханический анализатор ТМА 402 F1 фирмы Netzsch, скорость нагрева 5 °С/мин, постоянная нагрузка составляла 2Н.

Для проведения динамического механического анализа (ДМА) модифицированных композиций использовали прибор динамический механический анализатор DMA242 фирмы Netzsch при следующих параметрах испытания: частота 1 Гц, скорость потока газа (аргона) 50 мл/мин в интервале температур от –50 до 200 °С.

Результаты и обсуждение

По результатам проведенных исследований базовой и модифицированных композиций динамическим механическим методом температурные зависимости тангенса угла механических потерь

¹ ГОСТ 14039–78. Поливинилхлорид эмульсионный. Технические условия. URL: https://rosgos.ru/file/gost/83/080/gost_14039-78.pdf

² ТУ 2493-003-13004749–93. Пластификатор ЭДОС (дата введения: 01.03.1993).

³ ТУ 5716-001-99242323–2007. Мрамор молотый «РМ» (дата введения: 18.03.2008).

⁴ ТУ 2482-003-04706205–2004. КАТАПАВ 1214. Алкилбензилдиметиламмоний хлорид. CAS № 85409-22-9. URL: <https://niipav.ru/katapav-1214s-50/>

⁵ ГОСТ 14922–77. Государственный Стандарт Союза ССР. Аэросил. Технические условия (дата введения: 01.01.1978). URL: <https://docs.cntd.ru/document/1200007842>

⁶ ISO 15901-2. International Standard. Pores size distribution and porosity of solid materials by mercury porosimetry and gas adsorption. Second Edition 01.22.

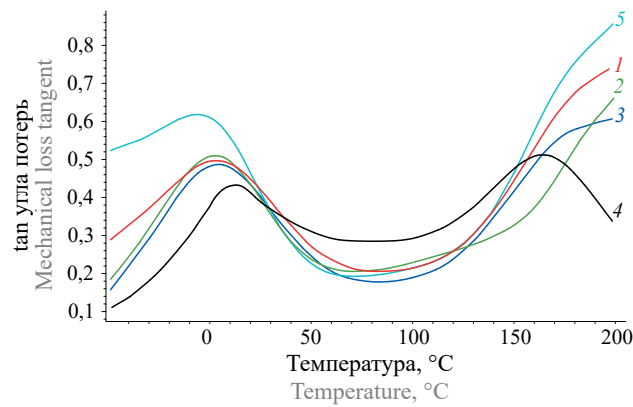


Рис. 1. Температурные зависимости тангенса угла механических потерь ПВХ композиций, модифицированных: 1 — ЗРШ + КАТАПАВ 1214С.50; 2 — ЗРШ; 3 — Аэросилом; 4 — СВ; 5 — базовый состав

Fig. 1. Temperature dependences of mechanical loss tangent for PVC composites modified by: 1 — RHA + CATAPAV 1214C.50; 2 — RHA; 3 — Aerosil; 4 — synthetic wollastonite (SW); 5 — basic composition

демонстрируют один максимум, соответствующий переходу полимера из стеклообразного в высокоэластическое состояние (рис. 1). Наличие одного максимума на температурных зависимостях тангенса угла механических потерь подтверждает высокую совместимость пластификатора ЭДОС с полимером, не зависящую от вида применяемого силиката [11, 12].

Согласно данным, представленным в табл. 1, все исследуемые наполнители повышают температуру перехода полимера из стеклообразного в высокоэластическое состояние (табл. 1).

Таблица 1. Температура, интенсивность максимума механических потерь и динамический модуль модифицированных силикатами ПВХ композиций

Table 1. Temperature, intensity of mechanical loss tangent and dynamic modulus of PVC composites modified by silicates

Модификатор Modifier	Температура max tg, °C/динамический модуль, МПа Temperature of mechanical loss tangent, °C/Dynamic modulus, MPa	Высота tg угла механических потерь в области α-максимума Height tg of the mechanical loss angle in the α-maximum region
Базовый состав Basic composition	–6,2/53	0,62
ЗРШ Rice husk ash (RHA)	3,6/86	0,51
ЗРШ, активированная КАТАПАВ 1214С.50 RHA activated by CATAPAV 1214C.50	2,8/92	0,50
СВ Synthetic wollastonite (SW)	9/96	0,43
Аэросил Aerosil	4,4/42	0,49

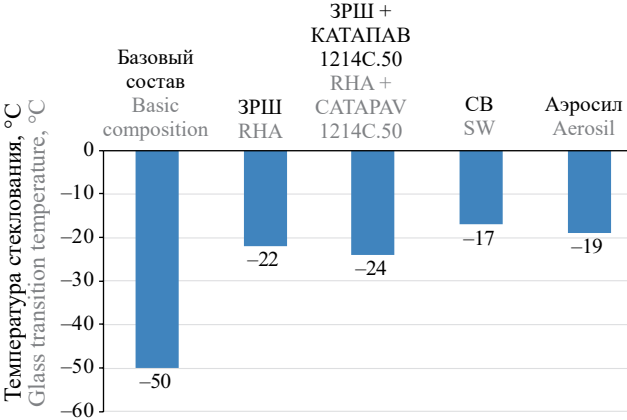


Рис. 2. Температура стеклования ПВХ композиций, модифицированных силикатами

Fig. 2. Glass transition point of PVC composites modified by silicates

Данный эффект объясняется протеканием взаимодействия на границе раздела фаз ПВХ матрица – силикат, в результате которого определенный объем ПВХ иммобилизуется, изменяется подвижность его макромолекул и, соответственно, плотность упаковки полимерных цепей. Полимерные цепи ориентируются вблизи твердой поверхности наполнителей — волластонита и силикатов [11, 12]. Как показывают данные табл. 1, промышленный наполнитель Аэросил увеличивает температуру α-перехода в большей степени, что подтверждают данные рис. 2 по изменению температуры стеклования модифицированного полимера.

На основании полученных экспериментальных данных можно сделать предположение, что благо-

Таблица 2. Характеристики пористости силикатов
Table 2. Porosity characteristics of silicates

Модификатор Modifier	Общий объем пор по ВЈН, см ³ /г Total pores volume under ВЈН, cm ³ /g	Средний диаметр пор по ВЈН, нм Average pores diameter under ВЈН, nm
ЗРШ RHA	0,08	4,1
ЗРШ, активированная КАТАПАВ 1214С.50 RHA activated by CATAPAV 1214С.50	0,03	4,2
СВ SW	0,18	4,0
Аэросил Aerosil	0,25	3,3

даря значительно меньшей пористости ЗРШ, по сравнению с Аэросилом (табл. 2), а также более высокому содержанию в ЗРШ кристаллической фазы [13] ее взаимодействие с пластификатором ЭДОС снижается. Легколетучие диоксановые спирты, основной компонент пластификатора ЭДОС, адсорбируются на поверхности силикатных наполнителей, осаждаются в порах их структуры, на что указывают размеры молекул компонентов пластификатора [12, 14], составляющие 0,6–1,7 нм, что в несколько раз меньше среднего размера пор исследуемых наполнителей (табл. 2).

Интенсивность t_g угла механических потерь в области основного максимума закономерно уменьшается при модификации силикатами и воластонитом, причем в большей степени при применении СВ (рис. 1, табл. 1). Это свидетельствует о снижении уровня (рис. 1) сегментальной подвижности $-\text{CH}_2-\text{CH}(\text{OСОСН}_3)-\text{CH}_2-$ групп ПВХ при введении силикатов [15] и образовании адгезионных связей «полимер – наполнитель».

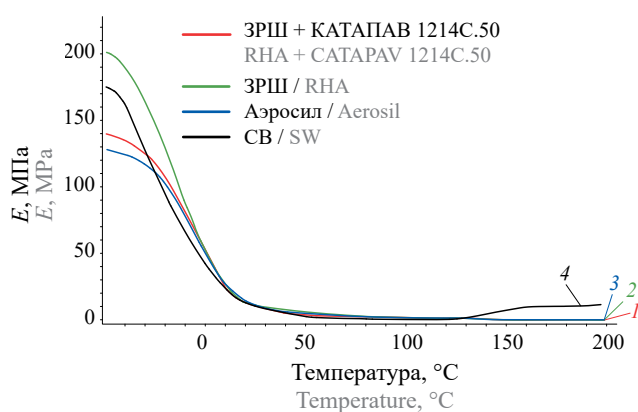


Рис. 3. Температурные зависимости динамического модуля ПВХ композиций, модифицированных: 1 — ЗРШ + КАТАПАВ 1214С.50; 2 — ЗРШ; 3 — Аэросилом; 4 — СВ

Fig. 3. Temperature dependencies of dynamic modulus of PVC composites modified by: 1 — RHA + CATAPAV 1214C.50; 2 — RHA; 3 — Aerosil; 4 — SW

Следовательно, по сравнению с базовым составом применение наполнителя Аэросила снижает значения динамического модуля модифицированных ПВХ композиций (табл. 1, рис. 3), что подтверждается снижением прочностных показателей ПВХ материалов с его применением [12, 14]. Данный эффект может быть обусловлен более низким адгезионным взаимодействием на границе раздела фаз ПВХ матрица – силикат, а также связан с высокой пористостью Аэросила (табл. 2).

По данным табл. 1 при применении в качестве наполнителей ЗРШ и СВ динамический модуль ПВХ материалов выше, чем при модификации Аэросилом (табл. 1), что связано с наличием у ЗРШ и СВ гидроксилсодержащих групп [16], которые образуют водородные связи с диоксановыми кольцами пластификатора или с атомом хлора ПВХ.

Активация поверхности ЗРШ ожидаемо увеличивает динамический модуль ПВХ материалов из-за роста межфазных взаимодействий.

Наиболее значительный рост динамического модуля ПВХ композиций имеет место при применении СВ (табл. 1) из-за его известного микроармирующего эффекта, обусловленного игольчатой формой частиц.

Характер релаксационных процессов, протекающих в ПВХ композициях, модифицированных активированной ПАВ ЗРШ, остается практически неизменным (рис. 1 и 3). Полученные данные коррелируют с характером температурных зависимостей динамического модуля и тангенса угла механических потерь.

Обработка поверхности ЗРШ поверхностно-активным КАТАПАВ С1214.50 приводит к смещению пика релаксационного перехода в область более низких температур (табл. 1), что обусловлено пластифицирующим действием пластификатора ЭДОС. Пористость активированной ЗРШ снижается

и, соответственно, меньший объем пластификатора задерживается в ее порах [12, 17].

Активация поверхности ЗРШ приводит к ограничению сегментальной подвижности макромолекул благодаря улучшению адгезионного взаимодействия между полимером и частицами ЗРШ [18]. Следует отметить, что ширина тангенса угла механических потерь при наполнении ПВХ композиций активированной ЗРШ уменьшается, что может быть обусловлено сокращением числа кинетических единиц, задействованных в размораживании сегментальной подвижности (рис. 1).

Литературные данные показывают, что наполнение и пластификация поливинилхлорида приводят к повышению однородности структуры композиционного материала [19, 20]. При этом на значения динамического модуля ПВХ композиций практически не влияет активация поверхности наполнителя ЗРШ (рис. 3, табл. 1) [19].

Заключение

В результате проведенных исследований было установлено, что модификация ПВХ композиций всеми исследованными силикатами и синтетическим волластонитом приводит к увеличению температуры стеклования и перехода полимера из стеклообраз-

ного состояния в высокоэластическое. Наибольший эффект обеспечивает волластонит с развитой кристаллической структурой, уменьшающий интенсивность тангенса угла механических потерь в области основного максимума.

Экспериментально подтверждено влияние пористости силиката на температуру стеклования модифицированных ПВХ композиций. Во всех изученных композициях, независимо от вида применяемого силикатного наполнителя, зафиксирован один максимум механических потерь в области α -релаксационного перехода, подтверждающий высокую совместимость пластификатора ЭДОС с полимером. При наполнении активированной ЗРШ ширина максимума тангенса угла механических потерь уменьшается, что указывает на повышение однородности модифицированного материала. Обработка поверхности золы рисовой шелухи поверхностно-активными четвертичными аммониевыми солями приводит к снижению температуры стеклования ПВХ композиций ввиду уменьшения пористости золы при активации.

Следует отметить, что использование синтетического волластонита и золы рисовой шелухи позволяет снизить стоимость производства за счет уменьшения количества дорогостоящих компонентов, таких как пластификаторы.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Колосова А.С., Сокольская М.К., Виткалова И.А., Торлова А.С., Пикалов Е.С. Современные полимерные композиционные материалы и их применение // Международный журнал прикладных и фундаментальных исследований. 2018. № 5 (1). С. 245–256. URL: <https://s.applied-research.ru/pdf/2018/5/12252.pdf>
2. Nadlene R., Sapuan S.M., Jawaid M., Ishak M.R., Yusriah L. The effects of chemical treatment on the structural and thermal, physical, and mechanical and morphological properties of roselle fiber-reinforced vinyl ester composites // Polymer Composites. 2018. No. 39. Pp. 274–287. DOI: 10.1002/pc.23927
3. Nwosu-Obieogu K., Chiemenem L.K., Adekunle K. Utilization of Rice Husk as Reinforcement in Plastic Composites Fabrication : a Review // American Journal of Materials Synthesis and Processing. 2016. No. 1 (3). Pp. 32–36. DOI: 10.11648/j.ajmsp.20160103.12
4. Fernandes I.J., Santos R.V., Dos Santos E.C.A., Rocha T.L.A.C., Domingues N.S., Moraes C.A.M. Replacement of Commercial Silica by Rice Husk Ash in Epoxy Composites : a Comparative Analysis // Materials Research. 2018. No. 21 (3). Pp. 1–10. DOI: 10.1590/1980-5373-mr-2016-0562
5. Gotlib E., Yamaleeva E., Thi Nya H.Ph. et al. Fillers of polymeric materials based on rice husk: Study Guide. Kazan : Otechestvo, 2019. P. 91. URL: https://rusneb.ru/catalog/000199_000009_010444109
6. Azarov G.M., Maiorova E.V., Oborina M.A., Belyakov A.V. Wollastonite raw materials and their applications : a review // Glass and Ceramics. 1995. No. 52. Pp. 237–240. DOI: 10.1007/BF00681090
7. Готлиб Е.М., Садыкова Д.Ф., Ямалеева Е.С. Волластонит — эффективный наполнитель резин и композиционных материалов на основе линейных и сетчатых полимеров : монография. М. : Lambert Academic Publishing, 2018. 180 с. URL: <https://a.co/d/j9PRK0K>
8. Chen S., Zhou X., Zhang S., Li Bo., Zhang T. Low temperature preparation of the β -CaSiO₃ ceramics based on the system CaO-SiO₂-BaO-B₂O₃ // Journal of Alloys and Compounds. 2010. No. 505 (2). Pp. 613–618. DOI: 10.1016/j.jallcom.2010.06.090
9. Ismail H., Shamsudin R., Abdul Hamid M.Z., Jalar A. Synthesis and Characterization of Nano-Wollastonite from Rice Husk Ash and Limestone // Materials Science Forum. 2013. Vol. 756. Pp. 43–47. DOI: 10.4028/www.scientific.net/MSF.756.43

10. Волоцкой А.Н., Юркин Ю.В., Авдонин В.В. Влияние типа наполнителя на динамические свойства вибропоглощающих полимерных композиционных материалов на основе этиленвинилацетата // Современные наукоемкие технологии. 2018. № 12. С. 31–36. DOI: 10.17513/snt.37258
11. Готлиб Е.М., Соколова А.Г. Композиционные материалы, пластифицированные ЭДОСом : монография. М. : Палеотип, 2012. 236 с. EDN CUGLBS.
12. Садыкова Д.Ф. Пластифицированные ПВХ материалы, модифицированные диоксидом кремния и волластонитом на основе золы рисовой шелухи : автореф. дис. ... канд. техн. наук. Казань, 2021. 19 с. URL: https://rusneb.ru/catalog/000199_000009_010936531/?ysclid=mbtrf4nmuh295796665
13. Hossain Sk.S., Roy P.K. Study of physical and dielectric properties of bio-waste derived synthetic wollastonite // Journal of Asian Ceramic Societies. 2018. No. 6 (3). Pp. 289–298. DOI: 10.1080/21870764.2018.1508549
14. Садыкова Д.Ф., Готлиб Е.М., Кожевников Р.В., Гарсия-Триньянес П. Влияние активации поверхности волластонита четвертичными аммониевыми солями на релаксационные свойства модифицированных им ПВХ-композиций // Бутлеровские сообщения. 2020. Т. 62. № 5. С. 64–71. EDN OIHNFO.
15. Шаравара А.М., Христофорова И.А. ПВХ-композиции и их применение // Международный научно-исследовательский журнал. 2019. № 2 (80). С. 84–86. DOI: 10.23670/IRJ.2019.80.2.015
16. Готлиб Е.М., Садыкова Д.Ф., Кожевников Р.В., Твердов И.Д., Мишагин К.А. Поливинилхлоридные композиции для линолеума с добавками наполнителей на основе рисовой шелухи // Известия высших учебных заведений. Химия и химическая технология. 2023. № 66 (2). С. 114–119. DOI: 10.6060/ivkkt.20236602.6692
17. Алексеенко В.В., Гонжитов А.Б., Бугдаев С.П. Влияние состава на физико-механические характеристики модифицированных ПВХ // Известия вузов. Инвестиции. Строительство. Недвижимость. 2024. № 14 (1). С. 20–29. DOI: 10.21285/2227-2917-2024-1-20-29. EDN YTBWB
18. Готлиб Е.М., Садыкова Д.Ф., Кожевников Р.В., Ямалеева Е.С. Влияние активации поверхности волластонита четвертичными аммонийными солями на свойства модифицированных им ПВХ композиций // Вестник технологического университета. 2017. № 20 (21). С. 35–36. URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/vliyanie-aktivatsii-poverhnosti-vollastonita-chetvertichnymi-ammoniynymi-solyami-na-svoystva-modifitsirovannyh-im-pvh-kompozitsiy/viewer>
19. Нафикова Р.Ф., Фаткуллин Р.Н., Афанасьев Ф.И., Степанова Л.Б., Исламутдинова А.А. Исследование влияния пластификатора ДЭС М-2 на физико-механические и технологические свойства // Пластические массы. 2020. № 3–4. С. 33–36. DOI: 10.35164/0554-2901-2020-3-4-33-36
20. Tiwari P., Choudhary S., Cloudhary M. Study on Mechanical, Thermal and Morphological Properties of RHA Filled PVC Composite // International Journal of Scientific Engineering and Applied Science (USEAS). 2015. No. 5 (1). Pp. 265–281. URL: <https://ijseas.com/volume1/v1i5/ijseas20150529.pdf>

REFERENCES

1. Kolosova A.S., Sokolskaya M.K., Vitkalova I.A., Orlova A.S., Pikalov E.S. Modern polymer composite materials and their application. *International Journal of Applied and Fundamental Research*. 2018; 5(1):245-256. URL: <https://s.applied-research.ru/pdf/2018/5/12252.pdf> (rus).
2. Nadlene R., Sapuan S.M., Jawaid M., Ishak M.R., Yusriah L. The effects of chemical treatment on the structural and thermal, physical, and mechanical and morphological properties of roselle fiber-reinforced vinyl ester composites. *Polymer: Composites*. 2018; 39:274-287. DOI: 10.1002/pc.23927
3. Nwosu-Obieogu K., Chiemenem L.K., Adekunle K. Utilization of Rice Husk as Reinforcement in Plastic Composites Fabrication : a Review. *American Journal of Materials Synthesis and Processing*. 2016; 1(3):32-36. DOI: 10.11648/j.ajmsp.20160103.12
4. Fernandes I.J., Santos R.V., Dos Santos E.C.A., Rocha T.L.A.C., Domingues N.S., Moraes C.A.M. Replacement of Commercial Silica by Rice Husk Ash in Epoxy Composites : a Comparative Analysis. *Materials Research*. 2018; 21(3):1-10. DOI: 10.1590/1980-5373-mr-2016-0562
5. Gotlib E., Yamaleeva E., Thi Nya H.Ph. et al. *Fillers of polymeric materials based on rice husk: Study Guide*. Kazan, Otechestvo, 2019; 91. URL: https://rusneb.ru/catalog/000199_000009_010444109
6. Azarov G.M., Maiorova E.V., Oborina M.A., Belyakov A.V. Wollastonite raw materials and their applications : a review. *Glass and Ceramics*. 1995; 52:237-240. DOI: 10.1007/BF00681090
7. Gotlib E.M., Sadykova D.F., Yamaleeva E.S. *Wollastonite — an effective filler for resins and composite materials based on linear and cross-linked polymers : monograph*. Moscow, Lambert Academic Publishing, 2017; 180. URL: <https://a.co/d/j9PRK0K> (rus).
8. Chen S., Zhou X., Zhang S., Li Bo., Zhang T. Low temperature preparation of the β -CaSiO₃ ceramics based on the system CaO-SiO₂-BaO-B₂O₃. *Journal of Alloys and Compounds*. 2010; 505(2):613-618. DOI: 10.1016/j.jallcom.2010.06.090

9. Ismail H., Shamsudin R., Abdul Hamid M.Z., Jalar A. Synthesis and Characterization of Nano-Wollastonite from Rice Husk Ash and Limestone. *Materials Science Forum*. 2013; 756:43-47. DOI: 10.4028/www.scientific.net/MSF.756.43
10. Volotskoy A.N., Yurkin Yu.V., Avdonin V.V. Influence of filler type on dynamic properties of damping polymer compositional materials based on ethylene-vinyl acetate. *Modern High Technologies*. 2018; 12:31-36. DOI: 10.17513/snt.37258 (rus).
11. Gotlib E.M., Sokolova A.G. *Composite materials plasticized with EDOS : monograph*. Moscow, Paleotip, 2012; 235. EDN CUGLBS. (rus).
12. Sadykova D.F. *Plasticized PVC materials modified with silicon dioxide and wollastonite based on rice husk ash : abstract of a dissertation for a candidate of technical sciences*. Kazan, 2021; 19. URL: https://rusneb.ru/catalog/000199_000009_010936531/?ysclid=mbtrf4nmuh295796665 (rus).
13. Hossain Sk.S., Roy P.K. Study of physical and dielectric properties of bio-waste derived synthetic wollastonite. *Journal of Asian Ceramic Societies*. 2018; 6(3):289-298. DOI: 10.1080/21870764.2018.1508549
14. Sadykova D.F., Gotlib E.M., Kozhevnikov R.V., García-Triñanes P. Effect of activation of wollastonite surface by quaternary ammonium salts on the relaxation properties of PVC compositions modified by it. *Butlerov Communications*. 2020; 62(5):64-71. DOI: 10.37952/ROI-jbc-01/20-62-5-64 (rus).
15. Sharavara A.M., Khristoforova I.A. PVC compositions and their application. *International Research Journal*. 2019; 2(80):84-86. DOI: 10.23670/IRJ.2019.80.2.015 (rus).
16. Gotlib E.M., Sadykova D.F., Kozhevnikov R.V., Tverdov I.D., Mishagin K.A. Polyvinyl chloride compositions with fillers based on rice husk for linoleum. *News. Higher educational institutions. Chemistry and chemical technology*. 2023; 66(2):114-119. DOI: 10.6060/ivkkt.20236602.6692 (rus).
17. Alekseenko V.V., Gonzhitov A.B., Bugdayev S.P. Influence of composition on physical and mechanical properties of modified PVC. *News of universities. Investments. Construction. Real estate*. 2024; 14(1):20-29. DOI: 10.21285/2227-2917-2024-1-20-29. EDN YTBJBW (rus).
18. Gotlib E.M., Sadykova D.F., Kozhevnikov R.V., Yamaleeva E.S. The influence of wollastonite surface activation by quaternary ammonium salts on the properties of PVC composites modified with it. *Bulletin of the Technological University*. 2017; 20(21):35-36. URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/vliyanie-aktivatsii-poverhnosti-vollastonita-chetvertichnymi-ammoniyinyami-solyami-na-svoystva-modifitsirovannyh-im-pvh-kompozitsiy/viewer> (rus).
19. Nafikova R.F., Fatkullin R.N., Afanasiev F.I., Stepanova L.B., Islamutdinova A.A. Study of the influence of plasticizer DES M-2 on the physical, mechanical and technological properties of plasticate PVC. *Plasticheskie massy*. 2020; 3-4:33-36. DOI: 10.35164/0554-2901-2020-3-4-33-36 (rus).
20. Tiwari P., Choudhary S., Cloudhary M. Study on Mechanical, Thermal and Morphological Properties of RHA Filled PVC Composite. *International Journal of Scientific Engineering and Applied Science (USEAS)*. 2015; 5(1):265-281. URL: <https://ijseas.com/volume1/v1i5/ijseas20150529.pdf>

Поступила 09.05.2025, после доработки 29.05.2025;

принята к публикации 02.06.2025

Received May 9, 2025; Received in revised form May 29, 2025;

Accepted June 02, 2025

Информация об авторах

САДЫКОВА Диляра Фанисовна, к.т.н., преподаватель кафедры химии и химической технологии материалов, Саратовский государственный технический университет имени Гагарина, 410054, г. Саратов, ул. Политехническая, 77; ORCID: 0000-0002-2010-1592; AuthorID: 57209311162; e-mail: dilyras@mail.ru

ГОТЛИБ Елена Михайловна, д.т.н., профессор кафедры технологии синтетического каучука, Казанский национальный исследовательский технологический университет, 420015,

Information about the authors

Dilyara F. SADYKOVA, Cand. Sci. (Eng.), Lecture, Department of Chemistry and Chemical Technology of Materials, Yuri Gagarin State Technical University of Saratov, Polytechnicheskaya St., 77, Saratov, 410054, Russian Federation; ORCID: 0000-0002-2010-1592; AuthorID: 57209311162; e-mail: dilyras@mail.ru

Elena M. GOTLIB, Dr. Sci. (Eng.), Professor of Department of technolog.rubber, Kazan National Research Technological, Karl Marx St., 68, Kazan, 420015, Russian Federation;

г. Казань, ул. Карла Маркса, 68; ORCID: 0000-0003-1666-8702; AuthorID: 6603371638; e-mail: GotlibEM@corp.knrtu.ru

СОКОЛОВА Алла Германовна, к.т.н., доцент кафедры строительного материаловедения, Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет, 129337, г. Москва, Ярославское шоссе, 26; ORCID: 0000-0001-8425-1883; ResearcherID: F-3314-2017; AuthorID: 57202822282; e-mail: as.falconi@yandex.ru

Вклад авторов:

Садыкова Д.Ф. — *идея; обработка материала; написание статьи.*

Готлиб Е.М. — *концепция; научное редактирование текста; общее руководство.*

Соколова А.Г. — *сбор материала; обработка материала. Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.*

ORCID: 0000-0003-1666-8702; AuthorID: 6603371638; e-mail: GotlibEM@corp.knrtu.ru

Alla G. SOKOLOVA, Cand. Sci. (Eng.), Associate Professor of the Department of Materials Science, National Research Moscow State University of Civil Engineering (National Research University), Yaroslavskoye Shosse, 26, Moscow, 129337, Russian Federation; ORCID: 0000-0001-8425-1883; ResearcherID: F-3314-2017; AuthorID: 57202822282; e-mail: as.falconi@yandex.ru

Contribution of the authors:

Sadykova D.F. — *idea; processing of the material; writing the article.*

Gotlib E.M. — *concept; scientific editing of the text; general guidance.*

Sokolova A.G. — *collection of the data; processing of the data. The authors declare that there is no conflict of interest.*

ПРАВИЛА ДЛЯ АВТОРОВ!

Направляемые в журнал «ПОЖАРОВЗРЫВОБЕЗОПАСНОСТЬ/FIRE AND EXPLOSION SAFETY» статьи должны содержать результаты научных исследований и испытаний, описания новых технических устройств и программно-информационных продуктов; обзоры, комментарии к нормативно-техническим документам, справочные материалы и т.п. Авторы должны указать, к какому типу относится их статья:

- научно-теоретическая;
- научно-эмпирическая;
- аналитическая (обзорная);
- дискуссионная;
- рекламная.

Не допускается направлять в редакцию работы, которые были опубликованы и/или приняты к печати в других изданиях.

Редакция просит авторов при подготовке рукописи руководствоваться изложенными ниже правилами.

1. Статья и сопутствующие ей материалы должны быть направлены через электронную редакцию по адресу info@fire-smi.ru.

Статья должна быть ясно и лаконично изложена и подписана всеми авторами (скан страницы с подписями). Основной текст статьи должен содержать в себе четкие, логически взаимосвязанные разделы. Все разделы должны начинаться приведенными ниже заголовками, выделенными полужирным начертанием. Для научной статьи традиционными являются следующие разделы:

- введение;
- материалы и методы (методология) — для научно-эмпирической статьи;
- теоретические основы (теория и расчеты) — для научно-теоретической статьи;
- результаты и их обсуждение;
- заключение (выводы).

Редакция допускает и иную структуру, обусловленную спецификой конкретной статьи (аналитической (обзорной), дискуссионной, рекламной) при условии четкого выделения разделов:

- введение;
- основная (аналитическая) часть;
- заключение (выводы).

Подробную информацию о содержании каждого из обозначенных выше разделов см. на сайте издательства www.fire-smi.ru.

Материал статьи должен излагаться в следующем порядке.

2.1. Номер УДК (универсальная десятичная классификация).

2.2. Заглавие статьи (на русском и английском языках). Заглавия научных статей должны быть точными и лаконичными и в то же время достаточно информативными; в них можно использовать только общепринятые сокращения. В переводе заглавий статей на английский язык недопустима транслитерация с русского языка, кроме непереводаемых названий собственных имен, приборов и других объектов, имеющих собственные названия, а также непереводаемый сленг, известный только русскоговорящим специалистам. Это касается также аннотаций, авторских резюме и ключевых слов.

2.3. Информация об авторах.

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

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

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

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

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

2.3.3. ORCID, Researcher ID, Scopus Author ID.

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

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

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

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

Выводы могут сопровождаться рекомендациями, оценками, предположениями, 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 вверху флажок «Американская (для визы США)»; если автор цитируемой статьи имеет свой вариант транслитерации своей фамилии, следует использовать этот вариант);
- заглавие на английском языке — для статьи, транслитерация и перевод названия — для книги;
- название источника (журнала, сборника статей, материалов конференции и т.п.) в транслитерации и на английском языке (курсивом, через косую черту);
- выходные данные;
- указание на язык изложения материала в скобках (например, (in Russian)).

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

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

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

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

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

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