

3-2020

**FIRE** and EXPLOSION  
**SAFETY**

**ПОЖАРОВЗРЫВО-**

# БЕЗОПАСНОСТЬ



НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКИЙ ЖУРНАЛ

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

**КОМПЛЕКСНАЯ БЕЗОПАСНОСТЬ**

пожарная • промышленная • производственная • экологическая

ОБ УТОЧНЕННОЙ  
ОЦЕНКЕ КООРДИНАТ  
ОЧАГА ПОЖАРА  
В ПОМЕЩЕНИИ



26-я Международная выставка  
технических средств охраны  
и оборудования для обеспечения  
безопасности и противопожарной защиты



а Hyve event



Москва, Крокус Экспо

11–14  
августа  
2020



Видеонаблюдение



Контроль  
доступа



Охрана  
периметра



Противопожарная  
защита



Сигнализация  
и оповещение



Автоматизация  
зданий

РЕКЛАМА



[securika-moscow.ru](http://securika-moscow.ru)

Бесплатный билет  
по промо-коду:

**sec20p0**



**УЧРЕДИТЕЛЬ и ИЗДАТЕЛЬ —**  
**ООО «Издательство «ПОЖНАУКА»**

**Адрес:**

121596, Россия, г. Москва, ул. Горбунова,  
д. 2, стр. 3, пом. II, комн. 12

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  
77-69971 от 31 мая 2017 года.

Префикс DOI: 10.22227

**РЕДАКЦИЯ:**

Зав. редакцией **Дядичева А.А.**

Координатор выпуска **Соколова Н.Н.**

Редактор **Махиянова Е.Б.**

Корректор **Светличная Л.В.**

Дизайнер **Федотов А.Д.**

**Адрес редакции:**

121596, Россия, г. Москва,  
ул. Горбунова, д. 2, стр. 3, пом. II, комн. 12

**Адрес для переписки:**

121352, Россия, г. Москва, а/я 26.

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

**E-mail:** info@fire-smi.ru

**https://www.fire-smi.ru**

Журнал включен 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 29.06.2020.  
Выход в свет 30.06.2020.  
Формат 60 × 84 1/8. Тираж 2000 экз.  
Мамага мелованная матовая.  
Печать офсетная. Цена свободная.  
Распространяется по подписке.

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

**ГЛАВНЫЙ РЕДАКТОР:**

**Корольченко Д.А.**, к. т. н., академик МАНЭБ, доцент (Национального исследова-  
тельский Московский государственный строительный университет, Москва, Россия)

**ЗАМ. ГЛАВНОГО РЕДАКТОРА:**

**Мольков В.В.**, д. т. н., профессор (Ольстерский университет, Ньютаунбиди, Север-  
ная Ирландия, Великобритания)

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

**РЕДАКЦИОННАЯ КОЛЛЕГИЯ:**

**Бакиров И.К.**, к. т. н., доцент (Уфимский государственный нефтяной технический  
университет, Уфа, Россия, Республика Башкортостан)

**Барбин Н.М.**, к. т. н., к. х. н., профессор (Уральский государственный аграрный  
университет, Екатеринбург, Россия)

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

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

**Брушлинский Н.Н.**, д. т. н., профессор, академик РАЕН, заслуженный деятель нау-  
ки РФ, профессор (Академия Государственной противопожарной службы МЧС Рос-  
сии, Москва, Россия)

**Бурханов А.И.**, д. ф.-м. н., доцент (Волгоградский государственный технический  
университет, Волгоград, Россия)

**Вагнер П.**, д. т. н., профессор (Академия пожарной службы Берлина, Берлин, Гер-  
мания)

**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. Соломен-  
ко Российской академии наук, Санкт-Петербург, Россия)

**Поландов Ю.Х.**, д. т. н., профессор (Орловский государственный университет  
им. И. С. Тургенева, Орел, Россия)

**Пузач С.В.**, доктор технических наук, профессор, член-корреспондент НАНПБ, про-  
фессор (Академия Государственной противопожарной службы МЧС России, Москва,  
Россия)

**Раимбеков К.Ж.**, к. ф.-м. н., заместитель начальника по научной работе (Коктеша-  
уский технический институт Комитета по чрезвычайным ситуациям МВД Республики  
Казахстан, Кокшетау, Казахстан)

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

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

**Серков Б.Б.**, д. т. н., профессор, начальник учебно-научного центра проблем пожар-  
ной безопасности в строительстве, действительный член НАНПБ, профессор (Акаде-  
мия Государственной противопожарной службы МЧС России, Москва, Россия)

**Тамразян А.Г.**, д. т. н., профессор, действительный член ВАНКБ, профессор (Наци-  
ональный исследовательский Московский государственный строительный универ-  
ситет, Москва, Россия)

**Топольский Н.Г.**, д. т. н., профессор, академик РАЕН и НАНПБ, заслуженный де-  
ятель науки РФ, профессор (Академия Государственной противопожарной службы  
МЧС России, Москва, Россия)

**Холщевников В.В.**, д. т. н., профессор, академик и почетный член РАЕН, академик  
ВАНКБ, заслуженный работник высшей школы РФ, профессор (Национальный ис-  
следовательский Московский государственный строительный университет, Москва,  
Россия)

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

**Челани А.**, профессор (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, главный научный  
сотрудник (ВНИИПО МЧС России, Балашиха, Россия)

**Шилдс Т.Дж.**, профессор (Ольстерского университета, Ольстер, Великобритания)  
Шоус Р., доцент (Университет штата Пенсильвания, Юниверсити-Парк, Пенсильва-  
ния, США)

**Якуш С.Е.**, д. ф.-м. н., директор, заведующий лабораторией термогазодинамики  
и горения (Института проблем механики им. А. Ю. Ишлинского Российской академии  
наук, Москва, Россия)

# СОДЕРЖАНИЕ

# CONTENTS

## БЕЗОПАСНОСТЬ ВЕЩЕСТВ И МАТЕРИАЛОВ

## SAFETY OF SUBSTANCES AND MATERIALS

С.Г. ЦАРИЧЕНКО, В.В. КОЛЕСНИКОВ,  
Н.И. КОНСТАНТИНОВА, З.Ю. КОЗИНДА  
Актуальные вопросы обеспечения пожарной  
безопасности материалов внутренних конструктивных  
элементов специальных автомобилей

6

S.G. TSARICHENKO, V.V. KOLESNIKOV,  
N.I. KONSTANTINOVA, Z.YU. KOZINDA  
Actual questions of fire safety  
of materials internal structural elements  
for special vehicles

М.В. ГРАВИТ, В.А. ПРУСАКОВ, И.Г. КОРОТИН,  
Н.С. ТИМОФЕЕВ, Я.Б. СИМОНЕНКО  
Интумесцентная конструктивная изгибаемая огнезащита  
для конструкций и кабельных линий

18

M.V. GRAVIT, V.A. PRUSAKOV, I.G. KOROTIN,  
N.S. TIMOFEEV, Y.B. SIMONENKO  
Intumescent structural curve-following fire protection  
of civil structures and cable lines

## МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ, ЧИСЛЕННЫЕ МЕТОДЫ И КОМПЛЕКСЫ ПРОГРАММ

## MATHEMATICAL MODELING, NUMERICAL METHODS AND PROGRAM COMPLEXES

Л.Т. ТАНКЛЕВСКИЙ, И.А. БАБИКОВ, А.А. ТАРАНЦЕВ  
Об уточненной оценке  
координат очага пожара в помещении

33

L.T. TANKLEVSKIY, I.A. BABIKOV, A.A. TARANTSEV  
On a more precise assessment of coordinates  
of the seat of fire in the premises

Т.Ю. ЕРЕМИНА, Д.А. КОРОЛЬЧЕНКО  
Обзор программного обеспечения расчета  
огнестойкости строительных конструкций  
для различных моделей пожаров

44

T.Yu. EREMINA, D.A. KOROLCHENKO  
Overview of fire resistance  
calculation software  
for various fire models

## БЕЗОПАСНОСТЬ ЗДАНИЙ, СООРУЖЕНИЙ, ОБЪЕКТОВ

## SAFETY OF BUILDINGS, STRUCTURES, OBJECTS

Д.А. МИНАЙЛОВ  
Исследование огнестойкости стальных конструкций  
покрытия складских зданий в условиях различного  
температурного воздействия

54

D.A. MINAILOV  
Investigation of fire resistance  
of steel structures covering a warehouse building under  
different temperature conditions

## БЕЗОПАСНОСТЬ ЖИЗНЕДЕЯТЕЛЬНОСТИ

## LIFE SAFETY

В.В. ХОЛЩЕВНИКОВ, А.П. ПАРФЕНЕНКО  
Корректность компьютерной модели и наша жизнь

66

V.V. KHOLSHCHEVNIKOV, A.P. PARFENENKO  
Correctness of the computer model and our life

## АВТОМАТИЗИРОВАННЫЕ СИСТЕМЫ И СРЕДСТВА

## AUTOMATED SYSTEMS AND MEANS

А.Н. ЧЛЕНОВ, Т.А. БУЦЫНСКАЯ  
Оценка эффективности применения видеонаблюдения  
в системах противопожарной защиты

95

A.N. CHLENOV, T.A. BUTCINSKAYA  
Evaluation of application effectiveness of Closed-circuit  
television in fire protection systems

## СРЕДСТВА И СПОСОБЫ ТУШЕНИЯ ПОЖАРОВ

## MEANS AND WAYS OF FIRE EXTINGUISHING

А.В. КОКШАРОВ, С.И. ОСИПЕНКО, Е.В. ГАЙНУЛЛИНА  
Исследование термической  
устойчивости пены различной кратности

103

A.V. KOKSHAROV, S.I. OSIPENKO, E.V. GAYNULLINA  
Study of the thermal stability of foam  
of different expansion ratio

## ВОПРОС – ОТВЕТ

## QUESTION – ANSWER

А.С. ХАРЛАМЕНКОВ  
Избыточное давление 5 кПа при категорировании  
помещений по взрывопожарной и пожарной опасности

111

A.S. KHARLAMENKOV  
Overpressure 5 kPa in categorizing premises  
on explosion and fire hazards

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.



Пожарная безопасность специальных автомобилей

▲ Стр. 6



Огнезащита для конструкций и кабельных линий

◀ Стр. 18



Оценка координат очага пожара в помещении

▲ Стр. 33



Корректность компьютерной модели и наша жизнь

◀ Стр. 66



▶ Стр. 95

Видеонаблюдение в противопожарной защите

# КОМПЛЕКСНАЯ БЕЗОПАСНОСТЬ

пожарная • промышленная • производственная • экологическая

No. **3** VOL. 29  
2020

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

SCIENTIFIC AND TECHNICAL JOURNAL

**EXPLOSION**



**FIRE AND SAFETY**

POZHAROVZRYVOBEZOPASNOST

**FOUNDER and PUBLISHER —**  
"POZHNAUKA" Publishing House, Ltd.

**Address:**

Gorbunova St., 2, bldg. 3, office II, rm. 12,  
Moscow, 121596, 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 77-69971 on May 31, 2017.

DOI prefix: 10.22227.

**EDITORIAL STAFF:**

Chief of editorial staff **Dyadicheva A.A.**

Release coordinator **Sokolova N.N.**

Editor **Makhyanova E.V.**

Corrector **Svetlichnaya L.V.**

Layout **Fedotov A.D.**

**Address of Editorial Staff:**

Gorbunova St., 2, bldg. 3, office II, rm. 12,  
Moscow, 121596, Russia.

**Corresponding to:** Post office box 26,  
Moscow, 121352, Russia.

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

**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 29.06.2020.

Date of publication 30.06.2020.

Format is 60 × 84 1/8.

Printing is 2000 copies.

Chalk-overlay mat paper.

Offset printing. Free price.

Journal sells subscription.

Printing house of the Publishing house

MISI – MGSU

building 8, 26 Yaroslavlshoshe, Moscow,  
Russian Federation, 129337.

**EDITOR-IN-CHIEF:**

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

**DEPUTY EDITOR-IN-CHIEF:**

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

**R.A. Strizhak**, Dr. Sci. (Phys.-Math.) (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.), Professor (Urals State Agrarian University, Yekaterinburg, Russia)

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

**V.V. Kholshchevnikov**, Dr. Sci. (Eng.), Professor, Academician and Honoured Member of Russian Academy of Natural Sciences, Academician of World Academy of Sciences for Complex Safety, Honoured Higher Education Employee of the Russian Federation (National Research Moscow State University of Civil Engineering, Moscow, Russia)

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

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

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

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

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

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

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

Международная  
выставка и конференция  
по безопасности

**15 – 16  
сентября 2020**

Международный выставочный центр ЭКСПО  
г. Нур-Султан, Казахстан



## Пожарная безопасность и чрезвычайные ситуации

Эффективная площадка для производителей  
и поставщиков систем противопожарной защиты  
и аварийно-спасательного оборудования

### РАЗДЕЛЫ

- Системы пожарной сигнализации
- Огнетушители, пожарные краны и инвентарь
- Модульные установки водяного, порошкового и газового пожаротушения
- Системы дымоудаления и теплоудаления
- Огнеупорные вещества и смеси
- Поисково-спасательное оборудование и снаряжение
- Медицинское снаряжение и средства жизнеобеспечения
- Пожарная спецтехника и машины
- Транспортные средства для ликвидации последствий ЧС и оказания медицинской помощи
- Специальная защитная одежда и средства индивидуальной защиты
- Быстровозводимые укрытия

**По вопросам участия:**

Тел: +7 7172 64 23 23 (вн. 208)

E-mail: [natali@astana-expo.com](mailto:natali@astana-expo.com)

## Актуальные вопросы обеспечения пожарной безопасности материалов внутренних конструктивных элементов специальных автомобилей

© С.Г. Цариченко<sup>1✉</sup>, В.В. Колесников<sup>2</sup>, Н.И. Константинова<sup>3</sup>, З.Ю. Козинда<sup>4</sup>

- 1 ООО «АТЛАС» (Россия, 115191, г. Москва, ул. Новая Заря, 6)
- 2 Академия Государственной противопожарной службы МЧС России (Россия, 129366, г. Москва, ул. Бориса Галушкина, 4)
- 3 Всероссийский научно-исследовательский институт противопожарной обороны МЧС России (Россия, 143903, Московская обл., г. Балашиха, мкр. ВНИИПО, 12)
- 4 ООО «Центральный научно-исследовательский институт швейной промышленности» (Россия, 105120, г. Москва, Костомаровский пер., 3)

### АННОТАЦИЯ

**Введение.** Для автотранспортных средств, занятых перевозкой людей и грузов, быстрая эвакуация которых в случае возникновения пожара не может быть осуществлена, должны быть сформулированы специальные требования пожарной безопасности, в частности к отделке внутреннего интерьера. В действующих нормативных документах такие требования пожарной безопасности отсутствуют или отражены не в полной мере, что не обеспечивает безопасность персонала и грузов в условиях возможного пожара.

**Проблематика вопроса.** Оценка пожарной опасности материалов, используемых во внутренней конструкции элементов автотранспорта, ограничивается определением скорости распространения пламени по горизонтальной поверхности от маломощного источника зажигания и не учитывает другие опасные факторы пожара, влияющие на безопасную эвакуацию людей. Целью работы является разработка предложений по совершенствованию требований пожарной безопасности материалов внутреннего интерьера специальных автотранспортных средств.

**Результаты и их обсуждение.** Проведен сравнительный анализ существующих нормативных критериев и методов оценки пожарной опасности материалов, используемых для внутреннего интерьера транспортных средств. Результаты экспериментальной оценки параметров пожарной опасности материалов показали, что они, классифицированные как неогнеопасные по ГОСТ 25076–81 (ИСО 3795:1989), могут относиться к легковозгораемым, способным образовывать горящий расплав и к чрезвычайно опасным по показателю токсичности продуктов горения после проведения испытаний в соответствии с другими нормативными документами.

**Выводы.** Целесообразно ограничить использование легковозгораемых материалов для внутреннего интерьера специальных автомобилей. Наряду с используемым методом по оценке огнеопасности необходимо внести обязательные требования пожарной безопасности материалов, которые исключают использование материалов, образующих горящий расплав, и ограничивают токсичность продуктов горения.

**Ключевые слова:** специальные автотранспортные средства; материалы внутреннего интерьера; скорость горения; горящий расплав; токсичность продуктов горения

**Для цитирования:** Цариченко С.Г., Колесников В.В., Константинова Н.И., Козинда З.Ю. Актуальные вопросы обеспечения пожарной безопасности материалов внутренних конструктивных элементов специальных автомобилей // Пожаровзрывобезопасность/Fire and Explosion Safety. 2020. Т. 29. № 3. С. 6–17. DOI: 10.22227/PVB.2020.29.03.6-17

✉ Цариченко Сергей Георгиевич, e-mail: tsarichenko\_s@mail.ru

## Actual questions of fire safety of materials internal structural elements for special vehicles

© Sergey G. Tsarichenko<sup>1✉</sup>, Vladimir V. Kolesnikov<sup>2</sup>, Nataliya I. Konstantinova<sup>3</sup>, Zinaida Yu. Kozinda<sup>4</sup>

- 1 Open Liability Company "ATLAS" (Novaya Zarya St., 6, Moscow, 115191, Russian Federation)
- 2 State Fire Academy of Emercom of Russia (Borisa Galushkina St., 4, Moscow, 129366, Russian Federation)
- 3 All-Russian Research Institute for Fire Protection of Emercom of Russia (VNIIPPO, 12, Balashiha, Moscow region, 143903, Russian Federation)
- 4 Open joint stock company "CNIISHP" (Kostomarovski alleyway, 3, Moscow, 105120, Russian Federation)

### ABSTRACT

**Introduction.** Special requirements for fire safety, in particular for interior decoration, must be formulated for vehicles that are associated with the transport of people and goods, the rapid evacuation of which can not be carried out in the event

of a fire. The current regulatory documents do not contain fire safety requirements or do not fully reflect them, which does not ensure the safety of personnel and cargo in the event of a possible fire.

**Problems of the issue.** The fire hazard assessment of materials used in the internal structure of vehicle elements is limited to determining the speed of flame propagation on a horizontal surface from a low-power ignition source and does not take into account other fire hazards that affect the safe evacuation of people. The purpose of the work is to develop proposals for improving the fire safety requirements of interior materials of special vehicles.

**Results and discussion.** A comparative analysis of existing regulatory criteria and methods for assessing the fire hazard of materials used for the interior of vehicles. The results of experimental evaluation of fire hazard parameters of materials showed that they are classified as non-flammable according to GOST 25076, according to other standard methods can be considered flammable, capable of forming a burning melt and extremely dangerous in terms of toxicity of Gorenje products.

**Conclusions.** It is advisable to limit the use of flammable materials in the interior of special vehicles and, along with the method used for assessing the fire hazard, make mandatory requirements for the exclusion of the formation of a burning melt and the toxicity of combustion products.

**Keywords:** special vehicles; interior materials; combustion rate; burning melt; toxicity of combustion products

**For citation:** Tsarichenko S.G., Kolesnikov V.V., Konstantinova N.I., Kozinda Z.Yu. Actual questions of fire safety of materials internal structural elements for special vehicles. *Pozharovzryvobezopasnost/Fire and Explosion Safety*. 2020; 29(3):6-17. DOI: 10.22227/PVB.2020.29.03.6-17

✉ *Sergey Georgiyevich Tsarichenko*, e-mail: tsarichenko\_s@mail.ru

## Введение

Использование материалов для конструктивных элементов и отделки внутреннего интерьера в автотранспортных средствах, занятых перевозкой людей и грузов, должно регламентироваться специальными требованиями пожарной безопасности, поскольку быстрая эвакуация из этих автомобилей в случае пожара может быть затруднена. К таким автотранспортным средствам относятся автомобили скорой медицинской помощи, медицинские комплексы на шасси транспортных средств, пожарные автомобили, транспортные средства для аварийно-спасательных служб и полиции, перевозки денежной выручки и ценных грузов, оперативно-служебные транспортные средства для перевозки лиц, находящихся под стражей, а также транспортные средства, занятые в системе общественного транспорта.

В соответствии с положениями Технического регламента Таможенного союза ТР ТС 018/2011 «О безопасности колесных транспортных средств» определен перечень специальных и специализированных транспортных средств, к которым предъявляются дополнительные требования безопасности в соответствии со спецификой их функционального назначения. Данный подход к выделению специфических требований безопасности в отдельный раздел является абсолютно правильным, поскольку целенаправленно обеспечивает безопасность специальных автотранспортных средств.

Однако в существующих нормативных документах, регламентирующих, в частности, требования пожарной безопасности, нашли отражения только отдельные вопросы, которые не в полной мере отражают требования безопасности, предъявляемые к материалам внутреннего интерьера в условиях возможного пожара в автотранспортных средствах рассматриваемых классов. Кроме того,

пожарные требования к внутреннему интерьеру автомобилей скорой медицинской помощи, медицинских комплексов на шасси транспортных средств, транспортных средств для аварийно-спасательных служб и полиции, оперативно-служебных транспортных средств для перевозки лиц, находящихся под стражей, вообще не предъявляются.

Данное исследование посвящено вопросам разработки предложений для нормативных документов по пожарной безопасности материалов внутреннего обустройства на специальном автотранспорте и выбора оптимальных по эффекту огнезащиты материалов.

Целью работы является разработка предложений по совершенствованию требований пожарной безопасности материалов внутреннего интерьера специальных автотранспортных средств.

Основными задачами, необходимыми для достижения поставленной цели, являются проведение анализа существующих нормативных критериев и методов оценки пожарной опасности материалов, используемых для внутреннего интерьера транспортных средств, и выполнение комплексных экспериментальных исследований по изучению указанных параметров.

## Проблематика вопроса

К элементам внутреннего интерьера автомобиля относятся дверные панели с управляющими элементами, текстиль и наполнитель в обивке кресел, покрытие пола, потолка и стен, теплозвукоизоляционные материалы, герметизирующие прокладки [1]. В зависимости от типа и конструкции автомобиля на внутренний интерьер приходится около трети всей массы используемых в конструкции автомобилей полимеров, т.е. масса полимерных материалов может представлять значительную величину [2].



**Рис. 1.** Примеры пожаров в специальных автотранспортных средствах  
**Fig. 1.** Examples of fires in special vehicles

Изготовление элементов внутреннего интерьера из легковозгораемых материалов, по поверхности которых быстро распространяется пламя, представляет серьезную опасность в случае возникновения пожара [3], что подтверждается реальными случаями возгорания рассматриваемых автотранспортных средств (рис. 1).

В настоящее время наиболее полные требования к устойчивости к воспламенению материалов внутреннего интерьера представлены в Правилах ООН № 118 «Единообразные технические предписания, касающиеся характеристик горения материалов, используемых в конструкции внутренних элементов механических транспортных средств определенных категорий» в отношении характеристик горения (воспламеняемость, скорость горения и способность образовывать горящий расплав) материалов, применяемых в конструкции внутренних элементов транспортных средств классов II и III категории М3. Ужесточение требований обусловлено тяжелыми последствиями пожаров междугородних автобусов (рис. 2).

Особые требования к пожаробезопасности материалов внутреннего интерьера должны предъявляться и к пожарным автомобилям, работа которых по определению связана с необходимостью нахо-

диться в непосредственной близости и контакте с огнем и мощными тепловыми потоками. Вопросу устойчивости элементов конструкции пожарных автомобилей к воздействию внешних тепловых нагрузок был посвящен ряд работ [4–7], в которых в основном изучались вопросы защиты внутреннего пространства боевого отсека от внешнего теплового воздействия и пламени. При этом практически не рассматривался вопрос устойчивости к воспла-



**Рис. 2.** Пожар транспортного средства категории М3 (междугороднего автобуса)  
**Fig. 2.** Fire of a vehicle of category M3 (intercity bus)

менению и распространению горения материалов внутреннего интерьера.

Требования пожарной безопасности для материалов внутренней отделки рассматриваемых специальных автотранспортных средств должны быть существенно выше установленных к обычным легковым и грузовым автомобилям. Это объясняется необходимостью в случае возникновения пожара иметь достаточное количество времени для проведения пожарноспасательных мероприятий.

Немаловажное влияние на безопасность людей при пожаре может оказывать и токсичность летучих продуктов термического разложения материалов внутреннего интерьера автомобилей. Исходя из этого, необходимо изучить вопрос о необходимости учета токсичности продуктов горения материалов и других пожарных свойств материалов внутреннего интерьера, требования к которым не нашли отражения ни в одном из приведенных нормативных документов.

Условия, затрудняющие оперативную эвакуацию из аварийного автотранспортного средства, на наш взгляд, во многом аналогичны условиям эксплуатации водного, авиационного и железнодорожного транспорта, к которым предъявляются специальные комплексные требования в отношении пожарной безопасности материалов внутреннего интерьера, что может быть учтено при формировании аналогичных нормативных требований, предъявляемых к внутренней отделке рассматриваемых специальных автотранспортных средств.

Существующие требования пожарной безопасности к материалам внутренней отделки речных и морских судов, пассажирских вагонов железнодорожного транспорта и метро обеспечивают существенное снижение возможности возгорания и распространения огня, образования дыма и токсичных продуктов горения при возникновении пожара. С целью совершенствования требований безопасности к внутренней отделке интерьера специальных автомобилей представляется интерес сопоставить их с существующими критериями и параметрами оценки пожарной опасности материалов отделки других транспортных средств.

### Результаты и обсуждение

Для оценки пожарной опасности материалов внутренней отделки автотранспортных средств используется межгосударственный стандарт ГОСТ 25076–81 «Материалы неметаллические для отделки интерьера автотранспортных средств. Метод определения огнеопасности» (ИСО 3795:1989 «Транспорт дорожный, тракторы и машины для сельского и лесного хозяйства. Определение характеристик горения материалов обивки салона»),

который устанавливает метод определения огнеопасности и распространяется на неметаллические материалы, предназначенные для отделки интерьера автомобилей, автобусов, троллейбусов и других автотранспортных средств. Огнеопасность материала характеризуется скоростью и особенностями горения испытуемого образца материала, при этом материал считается огнеопасным, если скорость горения превышает 100 мм/мин.

Методикой оценки скорости горения в горизонтальном направлении, приведенной в Правилах ООН №118 для отдельных элементов интерьера, предусмотрена обязательная оценка скорости горения в вертикальном направлении и возможности образования горящего каплепадения.

Нормативные документы (ТР ТС 001–2011 «О безопасности железнодорожного подвижного состава», ГОСТ Р 55183–2012 «Вагоны пассажирские локомотивной тяги. Требования пожарной безопасности», НПБ–109 «Нормы пожарной безопасности. Вагоны метрополитена. Требования пожарной безопасности»), регламентирующие пожарную безопасность материалов внутреннего устройства пассажирских вагонов железной дороги и метрополитена, содержат требования к критериям оценки таких параметров, как горючесть, дымообразующая способность, способность распространять пламя по поверхности, токсичность продуктов горения (определяемых по ГОСТ 12.1.044–89 «Система стандартов безопасности труда (ССБТ). Пожаровзрывоопасность веществ и материалов. Номенклатура показателей и методы их определения» п. 4.3, 4.18, 4.19, 4.20, соответственно) и устойчивость к воспламенению текстильных материалов согласно ГОСТ Р 50810–95 «Пожарная безопасность текстильных материалов. Ткани декоративные. Метод испытания на воспламеняемость и классификация».

Материалы внутренней отделки морских судов в зависимости от функционального назначения проходят испытания по международным методикам согласно Кодексу ПИО 2010 (ч. 1, 3.5, 7–9, т. 2, ч. 10), ГОСТ 12.1.044–89. Указанные методы оценки предусматривают определение горючести, способности распространять пламя по вертикальной поверхности, дымообразования и токсичности продуктов горения, а также устойчивости к воспламенению текстильных материалов и изделий из них.

Существуют требования к материалам и покрытиям внутренней отделки речных судов, регламентированные Правилами Российского речного регистра (т. 2, ч. 10). Параметры горючести, дымообразующей способности, способности распространять пламя по поверхности, токсичности продуктов горения оцениваются согласно ГОСТ 12.1.044–89.

Таким образом, к материалам и изделиям для внутренней отделки транспортных средств, кроме автомобилей, предъявляются достаточно жесткие комплексные требования пожаробезопасности, исключающие использование следующих материалов: легковозгораемых, быстро распространяющих пламя по поверхности, с высокой дымообразующей способностью и высокоопасных по токсичности продуктов горения.

Из анализа приведенной выше информации следует, что общим свойством пожарной опасности материалов, применяемых для внутренней отделки различных транспортных средств, является их способность к возникновению и распространению горения, при этом оценка дымообразующей способности и токсичности продуктов горения для автотранспортных средств вообще не рассматривается.

В табл. 1 представлены результаты аналитических исследований по сопоставлению основных характеристик методов оценки способности поддерживать горение и распространять пламя по поверхности материалов внутреннего обустройства некоторых видов транспортных средств.

Как следует из приведенных данных, методы оценки горючести и способности распространения пламени в значительной степени различаются между собой по определению теплопроизводительности и времени воздействия источника зажигания, ориентации образца по отношению к источнику зажигания, размерам образцов, совокупности определяемых параметров.

Условия проведения испытаний согласно стандартным методам для оценки горючести и распространения пламени материалов внутреннего обустройства в представленных видах пассажирского транспорта (за исключением автомобильного) предусматривают использование более мощного теплового воздействия, что характеризует более высокую степень огнезащиты применяемых материалов при положительном результате испытаний.

Нормативные требования, предъявляемые к элементам конструкций внутреннего интерьера автомобильного транспорта по пожарной опасности материалов согласно ГОСТ 25076–81 (ИСО 3795:1989), ограничиваются только оценкой способности распространения пламени по горизонтальной поверхности от сравнительно маломощного источника зажигания (эквивалент горящей спички) и не включают комплексную оценку других опасных факторов пожара: образования горящего расплава, выделения токсичных летучих продуктов термического разложения и дыма, в том числе определяющих безопасную эвакуацию персонала и грузов при пожаре.

С целью сравнительной оценки комплекса показателей пожарной опасности материалов, исполь-

зуемых в настоящее время во внутреннем интерьере различных категорий автотранспортных средств, были проведены экспериментальные исследования некоторых видов звуко- и теплоизоляционных материалов. Различными стандартными методами испытаний, входящими в нормативную базу требований, регламентирующих их безопасное применение, были изучены следующие параметры: распространение пламени по поверхности, дымообразующая способность, токсичность продуктов горения. Для оценки легкости возгорания и возможности образования горящего каплепадения исследуемых материалов была использована методика ГОСТ Р 56027–2014 «Материалы строительные. Метод испытаний на возгораемость под воздействием малого пламени».

Для исследований были выбраны используемые в качестве тепло-звукоизоляционных и набивочных материалов сидений вспененные системы на основе полиуретана (ППУ), полипропилена (ППП), полиэтилена (ППЭ), а также нетканые материалы из полиэфирных волокон (ПЭВ). Представленные материалы находят наиболее широкое применение в автомобильной промышленности за рубежом. Учеными проводятся исследования по совершенствованию их эксплуатационных характеристик и степени огнестойкости, что нашло отражение в ряде работ [8–14].

Кроме того, для сравнения представлены экспериментальные данные пожарно-технических характеристик наиболее пожаробезопасных теплозвукоизоляционных материалов на основе термостойких волокон (ТСВ), используемых в пассажирском вагоне строения для железных дорог. Все указанные материалы выпускаются серийно, в соответствии с разработанной на них технической документацией. Наименования продукции и фирм-изготовителей в статье не приводятся в целях исключения разглашения информации, представляющей коммерческий интерес и носящей рекламный характер.

Как следует из данных, представленных в табл. 2, все указанные материалы, применяемые для внутренней отделки автотранспортных средств, удовлетворяют требованиям ГОСТ 25076–81 (ИСО 3795:1989) и считаются неогнеопасными, так как скорость горения не превышает 100 мм/мин.

Вместе с тем, по результатам комплексных исследований параметров пожарной опасности в соответствии с ГОСТ Р 56027–2014, все исследованные материалы относятся к группе легковозгораемых, с высокой дымообразующей способностью и высокоопасных, а материал 1 (см. табл. 2) — к чрезвычайно опасным, по показателю токсичности продуктов горения. Некоторые из материалов быстро распространяют пламя по поверхности

**Таблица 1.** Основные характеристики методов оценки параметров пожарной опасности материалов внутреннего интерьера некоторых видов транспортных средств

**Table 1.** Basic specifications of assessment methods of fire hazard parameters of interior finish materials for certain vehicle types

Вид транспортного средства Type of vehicle	Нормативный документ Regulatory document	Параметр оценки пожарной опасности материалов Parameter of material fire hazard assessment	Основные характеристики методов оценки пожарной опасности материалов Basic specifications of methods of material fire hazard assessment	Нормативные критерии оценки пожарной опасности материалов Standard criteria of material fire hazard assessment
Автомобили определенных категорий Motor vehicles of certain categories	ГОСТ 25076–81 GOST 25076–81	Скорость горения, $V$ мм/с Combustion rate, $V$ mm/s	Источник зажигания — горелка Бунзена диаметром $9,5 \pm 0,5$ мм, теплотворная способность газа пропан-бутан — $38 \pm 2,55$ МДж/м <sup>3</sup> Высота пламени — 38...40 мм Размер образцов — 360×100×13 мм Количество образцов — 5 Расположение образца — горизонтальное Время воздействия — 15...30 с Ignition source: Bunsen burner dia. $9.5 \pm 0.5$ mm, calorific value of propane-butane gas: $38 \pm 2.55$ MJ/m <sup>3</sup> Flame height — 38...40 mm Samples' size — 360×100×13 mm Quantity of samples — 5 pcs. Sample position — horizontal Exposure — 15...30 s	$V \leq 100$ мм/с Образец не загорелся в течение 30 с воздействия пламени горелки; погас, не догорев до начала мерной базы $V \leq 100$ mm/s The sample did not catch fire within 30 s of burner flames exposure; the flame went out before it had burned its way to the measurement reference point
Пассажирские вагоны железной дороги и метро, речные суда Passenger railway and metro carriages, river vessels	ГОСТ Р 55183–2012, НПБ–109, Правила Российского речного регистра (т. 2, ч. 10). GOST R 55183–2012, НПБ–109, Rules of Russian River Register (v. 2, p. 10).	Горючесть Combustibility	Источник зажигания — горелка диаметром $7,0 \pm 0,1$ мм, газ — пропан бутан Высота пламени — примерно 80 мм Размер образцов — 150×60 мм, толщина — не более 30 мм Количество образцов — 3 Расположение образца — вертикальное Время воздействия — 300 с Ignition source — burner dia. $7.0 \pm 0.1$ mm, gas — propane-butane Flame height — appr. 80 mm Sample size — 150×60 mm, thickness — max 30 mm Quantity of samples — 3 pcs Sample position — vertical Exposure — 300 s	Максимальная температура газообразных продуктов горения материала — $T_{\max}$ , °С Максимальное приращение температуры — $\Delta T_{\max}$ , °С Время достижения $\Delta T_{\max}$ — $\tau$ , мин Потеря массы образца — $\Delta m$ , % Трудногорючие материалы: $\Delta T_{\max} < 60$ °С, $\Delta m < 60$ % Горючие трудновоспламеняемые материалы: $T_{\max} > 4$ мин, $\Delta m < 60$ % Maximum temperature of gaseous material combustion products — $T_{\max}$ , °С Maximum temperature growth — $\Delta T_{\max}$ , °С Gain time of $\Delta T_{\max}$ — $\tau$ , min Sample's loss of mass — $\Delta m$ , % Slow-burning materials: $\Delta T_{\max} < 60$ °С, $\Delta m < 60$ %. Combustible and slow-burning materials: $T_{\max} > 4$ min, $\Delta m < 60$ %

Вид транспортного средства Type of vehicle	Нормативный документ Regulatory document	Параметр оценки пожарной опасности материалов Parameter of material fire hazard assessment	Основные характеристики методов оценки пожарной опасности материалов Basic specifications of methods of material fire hazard assessment	Нормативные критерии оценки пожарной опасности материалов Standard criteria of material fire hazard assessment
		Способность распространения пламени Fire-spreading capacity	<p>Источники зажигания: электрическая радиационная панель мощностью <math>32 \pm 3</math> кВт/м<sup>2</sup>; запальная горелка с высотой пламени <math>11 \pm 2</math> мм, размер образцов — <math>320 \times 140</math> мм, толщина — не более 20 мм Количество образцов — 5 Расположение образца — под углом <math>30^\circ</math> от вертикали в сторону радиационной панели Время воздействия — до момента прекращения распространения пламени</p> <p>Ignition sources: Electrical radiant heating panel <math>32 \pm 3</math> kW/m<sup>2</sup>; pilot burner with a flame height of <math>11 \pm 2</math> mm Sample size — <math>320 \times 140</math> mm, thicknesses — max 20 mm Quantity of samples — 5 pcs. Sample position — under an angle of <math>30^\circ</math> from the vertical plane inclined to the radiant panel Exposure — until the fire ceases to spread</p>	Безразмерный показатель — индекс распространения пламени $I \leq 20$ Dimensionless indicator — fire-spreading index $I \leq 20$
Морские суда Sea vessels	Кодекс ПИО 2010 (ч. 1, 3.5, 7–9, т. 2, ч. 10) PIO Code 2010 (p. 1, 3.5, 7–9, v. 2, p. 10)	Поверхностная воспламеняемость Superficial inflammability	<p>Источник зажигания — газовая радиационная панель мощностью <math>50</math> кВт/м<sup>2</sup> Размер образцов — <math>155 \times 800</math> мм, толщина — не более 20 мм Количество образцов — 3 Расположение образцов — вертикальное Время воздействия — до момента прекращения распространения пламени</p> <p>Ignition source — gas-heated radiation panel with <math>50</math> kW/m<sup>2</sup> specific heating power Sample size — <math>155 \times 800</math> mm, thickness — max 20 mm Quantity of samples — 3 pcs. Sample position — vertical Exposure — until the fire ceases to spread</p>	<p>Положительные результаты испытаний: – критический поток при затухании <math>CFE \geq 7,00</math> кВт·м<sup>-2</sup>; – теплота для устойчивого горения <math>Q_{SB} \geq 0,25</math> МДж·м<sup>-2</sup>; – общее тепловыделение <math>Q_i \leq 2,00</math> МДж; максимальная скорость тепловыделения <math>Q_p \leq 10,00</math> кВт</p> <p>Positive experimental results: – critical flow at extinguishing <math>CFE \geq 7.00</math> kW·m<sup>-2</sup>; – thermal energy for stable burning <math>Q_{SB} \geq 0.25</math> MJ·m<sup>-2</sup>; – total heat emission <math>Q_i \leq 2.00</math> MJ; maximum heat emission rate <math>Q_p \leq 10.00</math> kW</p>

**Таблица 2.** Результаты экспериментальных исследований параметров пожарной опасности материалов внутренней отделки транспортных средств  
**Table 2.** Results of experimental studies of the fire hazard parameters of vehicle internal finish materials

Номер материала Material No.	Материал/ толщина, мм/ плотность Material/ thickness, mm/ density	Методы и параметры оценки пожарной опасности Methods and parameters of fire hazard assessment						Индекс распространения пламени (п. 4.19) Fire spreading index (par. 4.19)	
		ГОСТ 25076-81 GOST 25076-81	ГОСТ 56027-2014 GOST 56027-2014	Токсичность продуктов горения (п. 4.20) Combustion products' toxicity (par. 4.20)			Дымобразующая способность (п. 418) Fume evolution (par. 418)		
		Скорость распространения пламени Fire spreading rate	Возгораемость Inflammability	Выход CO, мг/г Emission of CO, mg/g	Выход CO <sub>2</sub> , мг/г Emission of CO <sub>2</sub> , mg/g	Показатель токсичности H <sub>CSiP</sub> , кг/м <sup>3</sup> Toxicity index H <sub>CSiP</sub> , kg/m <sup>3</sup>	Коэффициент дымообразования D <sub>сп</sub> , м <sup>2</sup> /кг Index of fume evolution D <sub>sp</sub> , m <sup>2</sup> /kg		
1	ППУ/ 20/250 кг/м <sup>3</sup> PUR foam/ 20/250 kg/m <sup>3</sup>	≤ 100	–	ЛВ Easily flam	408	1,355	11.2	961	102
2	ППП/ 20/390 г/м <sup>2</sup> PP foam/ 20/390 g/m <sup>2</sup>	≤ 100	+	ЛВ Easily flam	190	914	32.0	1,012	99
3	ПЭВ/ 20/20 кг/м <sup>3</sup> PEV/ 20/20 kg/m <sup>3</sup>	≤ 100	+	ЛВ Easily flam	217	924	27.9	1,020	7.4
4	ППЭ/ 20/25 кг/м <sup>3</sup> PE foam/ 20/25 kg/m <sup>3</sup>	≤ 100	+	ЛВ Easily flam	310	1,012	20.7	1,010	8.2

(ГОСТ 12.1.044–89, п. 1.2.). Следует отметить, что материалы на основе полипропилена, полиэфирных волокон и вспененного полиэтилена, являясь термопластичными, способны образовывать горящий расплав, в значительной степени влияющий на возможность дальнейшего от него возгорания других материалов.

По опыту обеспечения пожарной безопасности, например, в пассажирских вагонах железной дороги и метро, использование такого рода материалов исключается из-за их несоответствия существующим требованиям, направленным на недопущение возникновения пожара, а в случае его возникновения — на возможность безопасной эвакуации пассажиров и сохранение материальных ценностей.

При разработке предложений по совершенствованию требований пожарной безопасности материалов внутренней отделки рассматриваемой группы специальных автотранспортных средств необходимо в качестве минимальной меры ввести ограничения на использование легковозгораемых материалов, обязательно учитывая при этом способность выделять токсичные летучие продукты горения. Для этого могут быть использованы стандартные методы испытаний и критерии, принятые в российской нормативной базе

Наряду с нормами ГОСТ 25076–81 (ИСО 3795:1989), применительно к специальным автомобилям целесообразно использовать оценку устойчивости к возгоранию, в том числе по признаку образования горящего расплава, на основании методики ГОСТ Р 56027–2014. Следует также ограничить использование материалов, чрезвычайно опасных по показателю токсичности продуктов горения, согласно методике испытаний, представленной в ГОСТ 12.1.044–89.

Для повышения пожаробезопасности материалов, используемых в некоторых категориях специального автотранспорта, имеет смысл учитывать комплекс параметров по аналогии с существующими требованиями, например, для пассажирского вагона строения.

Что касается выбора материалов для указанных целей, то по опыту применения теплозвукоизоляционных материалов, рекомендованных для транспортных средств, связанных с перевозкой пассажиров железнодорожным и водным транспортом, наибольший интерес в настоящее время представляют нетканые материалы пониженной пожарной опасности на основе термоогнестойких волокон. В настоящее время за рубежом уделяется большое внимание разработке, производству и применению таких материалов в различных областях, в том числе в автомобильной промышленности [15–19]. Аналогичные работы по созданию и внедрению

термоогнестойких материалов с улучшенными эксплуатационными характеристиками проводятся также и в Российской Федерации [19–22].

Указанные материалы имеют сертификат соответствия требованиям пожарной безопасности и документацию, подтверждающую санитарно-гигиеническую безопасность в соответствии с законодательством Российской Федерации в области санитарно-эпидемиологического благополучия.

Оптимальное соотношение волокон в композиции материала дает удовлетворительный результат одновременно по комплексу эксплуатационных свойств и соответствию установленным критериям пожарной безопасности (ГОСТ 12.1.044–89) — трудногорючие материалы, медленно распространяющие пламя по поверхности, индекс распространения пламени ( $I \leq 20$ ), умеренноопасные по показателю продуктов горения при экспозиции 30 мин ( $H_{Cl50} \geq 40$  г/м<sup>3</sup>), с умеренной дымообразующей способностью, коэффициент дымообразования ( $D_{cp} \leq 500$  м<sup>2</sup>/кг), что может определить целесообразность их применения в отделке специальных автомобилей в целях повышения пожарной безопасности.

## Выводы

Проведенный анализ нормативных требований обеспечения пожарной безопасности применительно к материалам внутреннего интерьера для различных видов автомобильного транспорта показал, что в стандартах и правилах, регламентирующих использование материалов для некоторых видов специального автотранспорта, или отсутствуют, или содержатся только отдельные требования по оценке устойчивости к воспламенению. Данный факт свидетельствует о том, что специфика выполняемых такими автомобилями функциональных задач и связанная с ними возможность быстрой эвакуации персонала и грузов в случае пожара не учитываются.

Показано, что существующие требования пожарной безопасности к материалам внутреннего обустройства, применяемым, например, в пассажирском железнодорожном и водном транспорте, существенно выше, чем в случае автотранспортных средств. Указанные требования являются комплексными, т.е. направлены на совокупность параметров, определяющих возможность материала воспламеняться, распространять пламя по поверхности, образовывать дым и токсичные продукты горения.

В результате проведенных сравнительных аналитических и экспериментальных исследований методов и параметров оценки пожарной опасности ряда материалов внутреннего интерьера различных транспортных средств установлено, что для автотранспортных средств существующая оценка

способности распространения пламени по горизонтальной поверхности от сравнительно маломощного источника зажигания (эквивалента горящей спички) не включает учета образования горящего расплава, токсичных летучих продуктов термического разложения и дыма — характеристик, определяющих, в том числе, безопасную эвакуацию персонала и грузов при пожаре.

В результате исследований установлено, что составной частью комплекса мероприятий по повышению безопасности в условиях возможного пожара в специальных автотранспортных средствах рассмотренных классов необходимо совершенствование требований, предъявляемых к пожарной безопасности материалов их внутреннего интерьера.

На основании проведения сравнительных исследований параметров и критериев пожарной опасности на примере теплозвукоизоляционных материалов можно сделать вывод о том, что целесообразно ограничить использование легковозгора-

емых материалов внутреннего интерьера специальных автомобилей.

Наряду с оценкой огнеопасности по ГОСТ 25076–81 (ИСО 3795:1989) внести обязательные требования оценки материалов, во-первых, по признаку исключения образования горящего расплава, взяв за основу методику ГОСТ Р 56027–2014, во-вторых, по показателю токсичности продуктов горения, исключив использование чрезвычайно опасных материалов согласно испытаниям по ГОСТ 12.1.044–89 для снижения риска отравления людей в случае возникновения пожара.

По опыту применения материалов, рекомендованных для транспортных средств, связанных с перевозкой пассажиров железнодорожным и водным транспортом, в качестве прокладочного материала в мягких элементах сидений и теплозвукоизоляционного материала для изоляции стен, потолков и трубопроводов могут быть рекомендованы нетканые термоогнестойкие материалы.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Костин А.Б.* Автомобилестроение как драйвер спроса на пластики // Пластикс. 2015. № 6 (146). С. 36–42. URL: <https://www.plastics.ru/pdf/journal/2015/06/Kostin.pdf> (дата обращения 28.04.20).
2. *Степанов И.С.* Автомобильные кузова и кабины. Классификация, проектирование, аэродинамика, конструкция, безопасность, комфортабельность. Saarbrücken : LAP LAMBERT Academic Publishing, 2013. 460 с.
3. *Хасанов Р.Х., Сидорин Е.С.* О повышении противопожарной безопасности автомобилей // Вестник Оренбургского государственного университета. 2011. № 10 (129). С. 70–75. URL: [http://vestnik.osu.ru/2011\\_10/12.pdf](http://vestnik.osu.ru/2011_10/12.pdf) (дата обращения 28.04.20).
4. *Цариченко С.Г., Константинова Н.И., Кривошапкина О.В., Колесников В.В.* К вопросу о тепловой защите специальной техники // Известия ЮФУ. Технические науки. 2014. № 1 (150). С. 247–249. URL: <http://old.izv-tn.tti.sfedu.ru/wp-content/uploads/2014/1/33.pdf> (дата обращения 28.04.20).
5. *Sokolianskiy V.V.* Way of forecasting of time of safe work of fire fighting vehicles on suppression of the open fires // Scientific Enquiry in the Contemporary World: Theoretical Basics and Innovative Approach. 2015. Vol. 3. Pp. 67–74.
6. *Sokolianskiy V.V.* Theoretical researches of thermal impact of the open fire on a cabin of the fire-fighting vehicle // European Science and Technology: 11th International Scientific Conference. Munich, 2015. Pp. 123–136.
7. *Мамаев В.В., Соколянский В.В.* Анализ результатов экспериментальных исследований стойкости кабин пожарных автомобилей к внешним тепловым воздействиям // Вестник Института гражданской защиты Донбасса. 2015. № 2 (2). С. 16–25. URL: <https://journals.indexcopernicus.com/api/file/viewByFileId/301604.pdf> (дата обращения 28.04.20).
8. *Raszkowska-Kaczor A., Stasiak A., Janczak K., Olewnik-Kruszkowska E.* Chemically crosslinked polyethylene foams of limited flammability // Polimery. 2015. Vol. 60. Issue 4. Pp. 283–285. DOI: 10.14314/polimery.2015.283
9. *Carosio F., Cuttica F., Di Blasio A., Alongi J., Malucelli G.* Layer by layer assembly of flame retardant thin films on closed cell PET foams: Efficiency of ammonium polyphosphate versus DNA // Polymer Degradation and Stability. 2015. Vol. 113. Pp. 189–196. DOI: 10.1016/j.polymdegradstab.2014.09.018
10. *Wu J.-N., Chen L., Fu T., Zhao H.-B., Guo D.-M., Wang X.-L., Wang Y.-Z.* New application for aromatic Schiff base: High efficient flame-retardant and anti-dripping action for polyesters // Chemical Engineering Journal. 2018. Vol. 336. Pp. 622–632. DOI: 10.1016/j.cej.2017.12.047
11. *Younis A.A.* Evaluation of the flammability and thermal properties of a new flame retardant coating applied on polyester fabric // Egyptian Journal of Petroleum. 2016. Vol. 25. Issue 2. Pp. 161–169. DOI: 10.1016/j.ejpe.2015.04.001
12. *Younis A.A.* Protection of polyester fabric from ignition by a new chemical modification method // Journal of Industrial Textiles. 2017. Vol. 47. Issue 3. Pp. 363–376. DOI: 10.1177/1528083716648761
13. *Fang Y., Liu X., Wang C.* Layer-by-layer assembly flame-retardant and anti-dripping treatment of polyethylene terephthalate fabrics // Journal of Engineered Fibers and Fabrics. 2019. Vol. 14. DOI: 10.1177/1558925019870301
14. *Jin F.-L., Zhao M., Park M., Park S.-J.* Recent trends of foaming in polymer processing: a review // Polymers. 2019. Vol. 11. Issue 6. P. 953. DOI: 10.3390/polym11060953

15. Atakan R., Sezer S., Karakas H. Development of nonwoven automotive carpets made of recycled PET fibers with improved abrasion resistance // *Journal of Industrial Textiles*. 2020. Vol. 49. Issue 7. Pp. 835–857. DOI: 10.1177/1528083718798637
16. Horrocks A.R. Textile flammability research since 1980 — Personal challenges and partial solutions // *Polymer Degradation and Stability*. 2013. Vol. 98. Issue 12. Pp. 2813–2824. DOI: 10.1016/j.polymdegradstab.2013.10.004
17. Tychanicz-Kwiecień M., Wilk J., Gil P. Review of high-temperature thermal insulation materials // *Journal of Thermophysics and Heat Transfer*. 2019. Vol. 33. Issue 1. Pp. 271–284. DOI: 10.2514/1.T5420
18. Bao Y., Zhao X. The research applications of new heat insulation composite material in automobiles // *Heat Transfer*. 2018. Vol. 47. Pp. 103–110. DOI: 10.1002/htj.21293
19. Молдагажиева З.Д., Таласпаева А.А., Жилисбаева Р.О. Новые огнестойкие нетканые материалы // *Вестник Алматинского технологического университета*. 2015. № 3. С. 18–23.
20. Айзеништейн Э.М. Мировое и отечественное производство и потребление нетканых материалов // *Деловой журнал Neftegaz.RU*. 2018. № 2 (74). С. 64–72. URL: <https://magazine.neftgaz.ru/articles/pererabotka/514108-mirovye-i-otchestvennoe-proizvodstvo-i-potreblenie-netkanykh-materialov/>
21. Дянкова Т.Ю. Теоретическое обоснование и разработка технологий колористической отделки волокнистых материалов на основе высокопрочных, термо-огнестойких полигетероариленов : дис. ... д-ра техн. наук. СПб., 2011. 427 с.
22. Сергеева Е.А., Костина К.Д. Анализ ассортимента арамидных волокон и их свойств // *Вестник технологического университета*. 2015. Т. 18. № 14. С. 124–125.

## REFERENCES

1. Kostin A.B. Automotive as a driver of demand for plastics. *Plastics*. 2015; 6(146):36-42. URL: <https://www.plastics.ru/pdf/journal/2015/06/Kostin.pdf> (Accessed 28th April 2020). (rus.).
2. Stepanov I.S. *Automobile Bodies and Cabs. Classification, Design, Aerodynamics, Construction, Safety, Comfort*. Saarbrücken, LAP LAMBERT Academic Publishing, 2013; 460. (rus.).
3. Khasanov R.Kh., Sidorin Ye.S. On improving car fire safety. *Vestnik of the Orenburg State University*. 2011; 10(129): 70-75. URL: [http://vestnik.osu.ru/2011\\_10/12.pdf](http://vestnik.osu.ru/2011_10/12.pdf) (Accessed 28th April 2020). (rus.).
4. Tsarichenko S.G., Konstantinova N.I., Krivoshapkina O.V., Kolesnikov V.V. To the issue of heat protection of special equipment. *Izvestiya SFedU. Engineering Sciences*. 2014; 1(150):247-249. URL: <http://old.izv-tn.ti.sfedu.ru/wp-content/uploads/2014/1/33.pdf> (Accessed 28th April 2020). (rus.).
5. Sokolianskiy V.V. Way of forecasting of time of safe work of fire fighting vehicles on suppression of the open fires. *Scientific Enquiry in the Contemporary World: Theoretical Basics and Innovative Approach*. 2015; 3:67-74. (rus.).
6. Sokolianskii V.V. Theoretical researches of thermal impact of the open fire on a cabin of the fire-fighting vehicle. *European Science and Technology: 11th International Scientific Conference*. Munich, 2015; 123-136. (rus.).
7. Mamaev V.V., Sokolyanskiy V.V. Analysis of results of experimental studies of cabins of fire trucks resistance to external thermal influences. *Donbass International Journal of Emergency and Applied Knowledge Management*. 2015; 2(2): 16-25. URL: <https://journals.indexcopernicus.com/api/file/viewByFileId/301604.pdf> (Accessed 28th April 2020). (rus.).
8. Raszowska-Kaczor A., Stasiak A., Janczak K., Olewnik-Kruszkowska E. Chemically crosslinked polyethylene foams of limited flammability. *Polimery*. 2015; 60(4):283-285. DOI: 10.14314/polimery.2015.283
9. Carosio F., Cuttica F., Di Blasio A., Alongi J., Malucelli G. Layer by layer assembly of flame retardant thin films on closed cell PET foams: Efficiency of ammonium polyphosphate versus DNA. *Polymer Degradation and Stability*. 2015; 113:189-196. DOI: 10.1016/j.polymdegradstab.2014.09.018
10. Wu J.-N., Chen L., Fu T., Zhao H.-B., Guo D.-M., Wang X.-L., Wang Y.-Z. New application for aromatic Schiff base: High efficient flame-retardant and anti-dripping action for polyesters. *Chemical Engineering Journal*. 2018; 336:622-632. DOI: 10.1016/j.cej.2017.12.047
11. Younis A.A. Evaluation of the flammability and thermal properties of a new flame retardant coating applied on polyester fabric. *Egyptian Journal of Petroleum*. 2016; 25(2):161-169. DOI: 10.1016/j.ejpe.2015.04.001
12. Younis A.A. Protection of polyester fabric from ignition by a new chemical modification method. *Journal of Industrial Textiles*. 2016; 47(3):363-376. DOI: 10.1177/1528083716648761
13. Fang Y., Liu X., Wang C. Layer-by-layer assembly flame-retardant and anti-dripping treatment of polyethylene terephthalate fabrics. *Journal of Engineered Fibers and Fabrics*. 2019; 14. DOI: 10.1177/1558925019870301
14. Jin F.-L., Zhao M., Park M., Park S.-J. Recent trends of foaming in polymer processing: a review. *Polymers*. 2019; 11(6):953. DOI: 10.3390/polym11060953
15. Atakan R., Sezer S., Karakas H. Development of nonwoven automotive carpets made of recycled PET fibers with improved abrasion resistance. *Journal of Industrial Textiles*. 2020; 49(7):835-857. DOI: 10.1177/1528083718798637
16. Horrocks A.R. Textile flammability research since 1980 — Personal challenges and partial solutions. *Polymer Degradation and Stability*. 2013; 98(12):2813-2824. DOI: 10.1016/j.polymdegradstab.2013.10.004

17. Tychanicz-Kwiecień M., Wilk J., Gil P. Review of high-temperature thermal insulation materials. *Journal of Thermophysics and Heat Transfer*. 2019; 33(1):271-284. DOI: 10.2514/1.T5420
18. Bao Y., Zhao X. The research applications of new heat insulation composite material in automobiles. *Heat Transfer*. 2018; 47:103-110. DOI: 10.1002/hjt.21293
19. Moldagazhiyeva Z.D., Talaspayeva A.A., Zhilibayeva R.O. New fire-resistant non-woven materials. *The Journal of Almaty Technological University*. 2015; 3:18-23. (rus.).
20. Eisenstein E.M. World and domestic production and consumption of nonwoven materials. *Business magazine Neftegaz. RU*. 2018; 2(74):64-72. URL: <https://magazine.neftegaz.ru/articles/pererabotka/514108-mirovoe-i-otechestvennoe-proizvodstvo-i-potreblenie-netkanykh-materialov/> (rus.).
21. Dyankova T.Yu. *Theoretical substantiation and development of technologies for the coloristic finishing of fibrous materials based on high-strength, thermo-fire-resistant polyheteroarylenes : dissertation of Dr. tech. sciences*. St. Petersburg, 2011; 427. (rus.).
22. Sergeeva E.A., Kostina K.D. Analysis of the assortment of aramid fibers and their properties. *Bulletin of the Technological University*. 2015; 18(14):124-125. (rus.).

Поступила 15.04.2020, после доработки 7.05.2020;  
принята к публикации 29.05.2020

Received April 15, 2020; Received in revised form May 7, 2020;  
Accepted May 29, 2020

### Информация об авторах

**ЦАРИЧЕНКО Сергей Георгиевич**, д-р техн. наук, зам. ген. директора, ООО «Атлас», г. Москва, Российская Федерация; ORCID: 0000-0002-9807-6841; e-mail: tsarichenko\_s@mail.ru

**КОЛЕСНИКОВ Владимир Владимирович**, зам. нач. учебно-методического центра, начальник учебного отдела, Академия Государственной противопожарной службы МЧС России, г. Москва, Российская Федерация; ORCID: 0000-0002-5515-7895; e-mail: vvk48911@mail.ru

**КОНСТАНТИНОВА Наталия Ивановна**, д-р техн. наук, профессор, гл. науч. сотрудник отдела пожарной безопасности строительных материалов, Всероссийский научно-исследовательский институт противопожарной обороны МЧС России, г. Балашиха Московской обл., Российская Федерация; Scopus Author ID: 57195464313; ORCID: 0000-0003-0778-0698; e-mail: konstantinova\_n@inbox.ru

**КОЗИНДА Зинаида Юлиановна**, канд. техн. наук, зав. лабораторией, ОАО «Центральный научно-исследовательский институт швейной промышленности», г. Москва, Российская Федерация; Author ID: 785375; e-mail: z-kozinda@yandex.ru

### Information about the authors

**Sergey G. TSARICHENKO**, Dr. Sci. (Eng.), Deputy General Director of Open Liability Company "ATLAS", Moscow, Russian Federation; ORCID: 0000-0002-9807-6841; e-mail: tsarichenko\_s@mail.ru

**Vladimir V. KOLESNIKOV**, deputy head of the training center — head of the training department, State Fire Academy of Emercom of Russia, Moscow, Russian Federation; ORCID: 0000-0002-5515-7895; e-mail: vvk48911@mail.ru

**Nataliya I. KONSTANTINOVA**, Dr. Sci. (Eng.), Professor, Chief Researcher at Department of Fire Safety of Building Materials, All-Russian Research Institute for Fire Protection, Balashikha, Moscow Region, Russian Federation; Scopus Author ID: 57195464313; ORCID: 0000-0003-0778-0698; e-mail: konstantinova\_n@inbox.ru

**Zinaida Yu. KOZINDA**, Candidate of Sciences (Eng.), Head of Laboratory, Open joint stock company "CNIISHP", Moscow, Russian Federation; Author ID: 785375; e-mail: z-kozinda@yandex.ru

## Итумесцентная конструктивная изгибаемая огнезащита для строительных конструкций и кабельных линий

© М.В. Гравит<sup>1✉</sup>, В.А. Прусаков<sup>2</sup>, И.Г. Коротин<sup>3</sup>, Н.С. Тимофеев<sup>2</sup>, Я.Б. Симоненко<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Инженерно-строительный институт, Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого (Россия, 195251, г. Санкт-Петербург, ул. Политехническая, 29)

<sup>2</sup> ООО «ПРОМИЗОЛ» (Россия, 140073, Московская обл., г. Люберцы, р.п. Томилино, «Логопарк Томилино», лит. 2Ж)

<sup>3</sup> АО «Унихимтек» (Россия, 142181, Московская обл., г. Подольск, мкр. Климовск, ул. Заводская, 2)

### АННОТАЦИЯ

**Введение.** Авторами впервые разработана и внедрена конструктивная изгибаемая итумесцентная огнезащита не только для кабельной продукции, но и для строительных конструкций объектов капитального строительства (в том числе зданий и сооружений нефтегазового комплекса, поскольку возможна эксплуатация конструкций в условиях морского и арктического климата). Средство огнезащиты представляет собой рулонный материал с армированной структурой, вспучивающейся в трех направлениях (3-D) при воздействии термического удара.

**Методы.** Проведены испытания сохранения работоспособности кабельной линии в условиях пожара (по ГОСТ Р 53316–2009) и огнезащитной эффективности для кабеля (по ГОСТ Р 53311–2009). Выполнено моделирование сейсмического воздействия величиной 9 баллов по шкале MSK-64. Для определения пределов огнестойкости огнезащитную сетку оборачивали вокруг балок и колонн, согласно ГОСТ 30247.1–1994. Осуществлены проверка огнезащитной эффективности сетки (по ГОСТ 53295–2009) и термический анализ покрытия (по ГОСТ Р 53293–2009).

**Результаты и обсуждение.** В результате стандартных испытаний получены следующие параметры огнезащитной сетки: огнезащитная эффективность — 15, 45 и 60 мин; пределы огнестойкости конструкций (балки) с огнезащитной сеткой — R15, R45 и R60; сейсмостойчивость — не менее 9 баллов по шкале MSK; категория 1 по ГОСТ 15150–69 (климатическое исполнение ХЛ, УХЛ, Т, ОМ, открытые площадки в указанных макроклиматических районах), что позволяет прогнозировать сохранение эксплуатационных свойств огнезащитной сетки в условиях арктического климата в течение не менее 10 лет; возможность проведения сухого монтажа в интервале температур –60 ... +90 °С при 100 % влажности.

**Выводы.** Разработана, сертифицирована и внедрена в серийное производство номенклатура итумесцентной конструктивной изгибаемой огнезащиты для различных конструкций (в том числе для легких стальных тонкостенных конструкций (ЛСТК)) и кабельных линий в виде морозо- и маслобензостойкой полимерной композиции на сетчатой негорючей основе.

**Ключевые слова:** здания; сооружения; предел огнестойкости; средства огнезащиты; огнезащитная сетка; углеводородный режим пожара

**Для цитирования:** Гравит М.В., Прусаков В.А., Коротин И.Г., Тимофеев Н.С., Симоненко Я.Б. Итумесцентная конструктивная изгибаемая огнезащита для строительных конструкций и кабельных линий воздействия // Пожаровзрывобезопасность/Fire and Explosion Safety. 2020. Т. 29. № 3. С. 18–32. DOI: 10.22227/PVB.2020.29.03.18-32

✉ Гравит Марина Викторовна, e-mail: marina.gravit@mail.ru

## Intumescent structural curve-following fire protection of civil structures and cable lines

© Marina V. Gravit<sup>1✉</sup>, Vasily A. Prusakov<sup>2</sup>, Igor G. Korotin<sup>3</sup>, Nikolay S. Timofeev<sup>2</sup>, Yana B. Simonenko<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Civil Engineering Institute, Peter the Great Saint Petersburg Polytechnic University (Politekhnikeskaya St., 29, Saint Petersburg, 195251, Russian Federation)

<sup>2</sup> "PROMIZOL" Ltd (Tomilino, 2G, Moscow Region, Lyubertsy, 140073, Russian Federation)

<sup>3</sup> "UNICHIMTEK" JSC (Zavodskaya St., 2, Moscow Region, Podolsk, mkr. Klimovsk, 142181, Russian Federation)

### ABSTRACT

**Introduction.** The authors claim to have originally invented and introduced structural curve-following intumescent fire protection not only for cabling, but also for civil structures of investment construction projects (also those of buildings and facilities of the oil&gas complex since the operation of the structures is possible also in the maritime and the Arctic climate areas). The fire-protection is roll material with structural reinforcement capable of 3D-swelling at a thermal shock.

**Statement of method.** Tests have been conducted of retained operability of a cable line in a fire (as per GOST R 53316–2009) and of the fire-protection efficiency for a cable (as per GOST R 53311–2009). A magnitude 9 seismic impact as

per MSK-64 was modeled. To determine the fire-resistance ratings, the fire-protection net was wrapped around columns and beams, as per GOST 30247.1–1994. A check of the fire-protection efficiency of the net (as per GOST 53295–2009) and a thermal analysis of the coating (as per GOST R 53293–2009) were executed.

**Results and discussion.** In the course of the standard tests, the following fire-protection net parameters were obtained: fire-protection efficiency — 15, 45 and 60 min; fire-resistance ratings of structures (beam) with the fire-protection net — R15, R45 and R60; seismic resistance at least magnitude 9 as per MSK; category 1 as per GOST 15150–69 (HL, UHL, T, OM climate designs, open grounds in the specified macro-climatic areas), allowing for retained operation properties of the fire-protection net in Arctic climate within at least 10 years; possibility of dry installation within a temperature range –60...90 °C at 100 % humidity.

**Conclusions.** A range of intumescent structural curve-following fire-protection materials for different civil structures (also for light thin-wall steel structures (LTWSS)) and cable lines in form of a frost- and oil-resistant polymer compound on non-flammable net base has been developed, certified and launched into serial manufacturing.

**Keywords:** buildings; facilities; fire-resistance rating; fire-protection materials; fire-protection net; hydrocarbon fire.

**For citation:** Gravit M.V., Prusakov V.A., Korotin I.G., Timofeev N.S., Simonenko Ya.B. Intumescent structural curve-following fire protection of civil structures and cable lines. *Pozharovzryvobezopasnost/Fire and Explosion Safety*. 2020; 29(3):18-32. DOI: 10.22227/PVB.2020.29.03.18-32

✉ Marina Viktorovna Gravit, e-mail: marina.gravit@mail.ru

## Введение

В проекте обновления СП 2.13130 «Системы противопожарной защиты. Обеспечение огнестойкости объектов защиты», окончательная редакция которого обсуждается экспертным сообществом, планируется изменить термины для средств огнезащиты. Так, в п. 3.2 *конструктивная огнезащита* будет определяться как «огнезащита строительных конструкций, основанная на создании на обогреваемой поверхности конструкции теплоизоляционного слоя, путем нанесения на нее толстослойных напыляемых составов, штукатурки, облицовки плитными, листовыми, штучными и другими аналогичными строительными материалами, в том числе на каркасе, с воздушными прослойками, в результате бетонирования и заливки затвердевающими растворами с использованием технологии опалубки, а также их комбинации».

В новой редакции СП 2.13330 определение *вспучивающегося покрытия* представлено как «слой (слои) огнезащитного состава, нанесенного на поверхность объекта огнезащиты, огнезащитное действие которого основано на многократном увеличении исходной толщины при тепловом воздействии и образовании теплоизоляционного слоя на защищаемой поверхности», в результате данное определение существенно сократилось и упростилось по сравнению с действующим нормативным документом. В отличие от термина в настоящей редакции, огнезащитное покрытие более не является «способом» (что само по себе неверное утверждение), конструктивные материалы и изделия приобрели обоснованное определение

В целом средства огнезащиты можно разделить по технологическому принципу применения (мокрый или сухой способ) и по принципу действия с изменением геометрических параметров при пожаре: в случае с конструктивной защитой они неизменны, в случае с интумесцентными составами тол-

щина сухого слоя покрытия существенно возрастает за счет образования пенококса [1].

При многих достоинствах интумесцентной огнезащиты (высокая производительность работ, возможность нанесения на труднодоступные участки и т.д.) [2–11] показатели параметров огнестойкости и огнезащитной эффективности при испытаниях часто нестабильны за счет образования трещин, вздутий, сдувания пенококса и оголения до металла (рис. 1).

Относительно недавно появились материалы, сочетающие в себе свойства конструктивной изгибаемой (рулонной) огнезащиты (в первую очередь, сухой монтаж и монтаж сразу готового изделия на поверхность защищаемого объекта) и интумесцентной защиты, когда при огневом воздействии образуется пенококс с низкой теплопроводностью, защищающий поверхность объекта защиты [1].

Известны материалы, например сеточная (тканевая) огнезащита Naruflam BS-Gewebe X-Color (Германия), предназначенная для предотвращения самовоспламенения электрических кабелей и кабельных систем из-за короткого замыкания или перегрева. В России Naruflam BS-Gewebe X-Color не сертифицирован. Технические характеристики этого типа огнезащиты: плотность сетки — 1,55...1,85 кг/м<sup>3</sup>; класс — B-s2, d0 (согласно BS EN 13501-1:2018); предел огнестойкости — EI 90/E 90 (согласно BS EN 13501-2:2016).

Компания «МорНефтеГазСтрой» (Россия) производит сетку «Инфлекс-ФК31», сертифицированную согласно ГОСТ 53311–2009 «Покрытия кабельные огнезащитные. Методы определения огнезащитной эффективности» (сертификат соответствия № С-RU.ПБ25.В.03554 от 24 февраля 2016 г.). Согласно тексту сертификата, сетка огнезащитная марки «Инфлекс-ФК-31» для кабелей (толщина — не менее 1,5 мм, размер ячейки материала-основы из стеклоткани — 4,0×4,0 мм) обеспечивает огнеза-



**Рис. 1.** Испытания интумесцентной краски известной марки, огнезащитная эффективность — 35 мин  
**Fig. 1.** Test of intumescent paint of a popular brand, fire-protection efficiency — 35 min

щитную эффективность для кабелей с оболочками из ПВХ пластиката, полиэтилена и резины при монтаже в один слой.

В патенте СА2938283 (А1)–2018-02-05 интумесцентная сетка описана следующим образом: «Гибкая сетка с множеством прядей, которые образуют ряд отверстий; вспучивающееся покрытие, нанесенное на гибкую сетку, причем вспучивающееся покрытие в качестве ингредиентов содержит вспениваемый графит и носитель на основе полимера; причем сетка имеет такой размер, чтобы вспучивающееся покрытие позволяло воздушному потоку проходить через гибкую сетку до тех пор, пока вспучивающееся покрытие не будет подвергаться воздействию температур, равных или превышающих температуру активации, после чего вспучивающееся покрытие набухает, герметизируя отверстия и предотвращая прохождение воздуха через гибкую сетку из проволоочной ткани»<sup>1</sup>.

Патентом RU22422 «Огнезащищенные металлические сетки для ограничения распространения пожаров» защищено решение, представляющее собой «огнезащитный экран, состоящий из одной или пакета металлических сеток, окрашенных вспенивающимися от теплового воздействия покрытиями, при этом размер сеточных ячеек, диаметр проволоки, толщина покрытия и кратность вспенивания краски должны обеспечивать полное перекрытие ячеек сетки при тепловом воздействии»<sup>2</sup>.

<sup>1</sup> Patent № CA 2938283 A1. Intumescent grid / W. Wall, A. Wall, S. Adab; Canadian Borax Inc. Appl. No. CA2938283A, 05.08.2016. Publ. 05.02.2018.

<sup>2</sup> Пат. РФ № RU 22422 U1. Огнезащищенные металлические сетки для ограничения распространения пожаров / патентообл. В.Р. Малинин, А.С. Крутолапов; заявл. № 2001125542/20, 14.09.2001; опубл. 10.04.2002.

Для упрочнения материала и его защиты от растрескивания или осыпания с подложки под воздействием пламени или экстремальных термических условий в покрывной материал встраивали такие армирующие материалы, как ткань из стекловолокна, графитовая ткань или проволоочная сетка. Примеры аналогичного подхода обнаружены также в патентах США<sup>3, 4, 5, 6</sup>.

Таким образом, наиболее эффективным средством огнезащиты, сочетающим лучшие качества конструктивной и интумесцентной огнезащиты в условиях теплового воздействия в экстремальных условиях (низкие температуры, влажность), является использование вспучивающихся огнезащитных материалов на гибкой основе [12–22]. В классификации средств огнезащиты необходимо выделить новый вид огнезащиты — конструктивную изгибаемую интумесцентную огнезащиту, которая наносится сухим способом и при этом вспучивается при огневом воздействии, т.е. сочетает характерные признаки как конструктивного материала, так и вспучивающихся покрытий. Образование пенококса происходит во всех трех измерениях (вверх, вниз и вдоль поверхности) — «3-dimension» [1]

<sup>3</sup> Patent № US 3,022,190 A. Process of and composition for controlling temperatures / R. Feldman; Emerson Electric Co. Appl. No. US15007A, 15.02.1960. Publ. 20.02.1962.

<sup>4</sup> Patent № US 3,913,290 A. Fire insulation edge reinforcements for structural members / R.W. Billing, G.K. Castle; Avco Corp. Appl. No. 478,844, 13.06.1974. Publ. 21.10.1975.

<sup>5</sup> Patent № US 3,915,777 A. Method of applying fire-retardant coating materials to a substrate having corners or other sharp edges / B.B. Kaplan; Albi Manuf Co Inc. Appl. No. 368,140, 08.06.1973. Publ. 28.10.1975.

<sup>6</sup> Patent № US 4,069,075 A. Structural support for char derived from intumescent coatings / R.W. Billing, G.K. Castle; Avco Corp. Appl. No. 544,168, 27.01.1975. Publ. 17.01.1978.

(рис. 2). Пенококк образуется в виде равномерного вспучивающегося пористого покрытия, обволакивающего поверхность конструкции, отсутствуют растрескивания, отвалившиеся части и т.д.

Целью исследования являлась разработка средства огнезащиты, представляющего собой гибкую мелкоячеистую сетку из негорючего материала с интумесцентной полимерной композицией. Огнезащитная сетка должна совмещать свойства конструктивной огнезащиты и вспучивающегося огнезащитного покрытия, обладать высокой огнезащитной эффективностью и надежными эксплуатационными характеристиками для повышения пределов огнестойкости строительных конструкций различного типа.

Поставленная цель решена авторами путем разработки огнезащитного конструктивного (в виде листового материала, который возможно поставлять в рулонах) интумесцентного изгибаемого покрытия, состоящего из эластичной полимерной композиции на основе морозоустойчивых и маслостойких синтетических каучуков, интеркалированного графита и других нерастворимых в воде компонентов, нанесенных на армирующую сетку из композиции минераловатных или углепластиковых волокон (патент RU2711076C1 «Огнезащитное интумесцентное рулонное покрытие»)<sup>7</sup> [23]. Возможно производство данного материала в различных цветовых сочетаниях за счет добавления пигментов, с вариативностью по размерам ячеек и плотности (с поверхностной плотностью 0,5...2,5 кг/м<sup>2</sup>) в зависимости от состава наносимой композиции и типа армирующей сетки. Огнезащитная сетка оборачивается вокруг изделия (конструкции) в один и более слоев. Максимальная температура эксплуатации при положительных температурах определена как «не более 90 °С», поскольку процесс образования пенококка начинается в интервале 180...220 °С. Минимальная температура эксплуатации определяется, исходя из морозостойкости компонентов и композиции и достигает значений до -60 °С, что подтверждается результатами испытаний по ГОСТ 15150-69 «Машины, приборы и другие технические изделия. Исполнения для различных климатических районов. Категории, условия эксплуатации, хранения и транспортирования в части воздействия климатических факторов внешней среды» (категория 1 для климатического исполнения ХЛ, УХЛ, Т, ОМ, открытые площадки в указанных макроклиматических районах). Сейсмоустойчивость — не менее 9 баллов по шкале MSK.

<sup>7</sup> Пат. РФ № RU 2711076 C1. Огнезащитное интумесцентное рулонное покрытие / патентообл. В.А. Прусаков, М.В. Гравит; заявл. № 2019107024, 13.03.2019; опублик. 15.01.2020.

Для достижения данной цели необходимо было решить ряд задач, а именно: проанализировать зависимость показателей, получаемых при различных испытаниях, от количества заполненных полимерной композицией ячеек, поверхностной плотности сетки и количества слоев, оборачиваемых вокруг изделия или конструкции; спрогнозировать поведение строительной конструкции с огнезащитой при различных исходных характеристиках изгибаемой огнезащиты.



Рис 2. Пенококк на сетке стального двутавра

Fig. 2. Coke foam on the net of a steel I-beam

## Методы

Разработано более 10 видов рецептов огнезащитной композиции для различных видов изделий и назначения (рис. 3). Для оптимального подбора типа огнезащитной сетки (максимальный коксовый остаток, минимальная потеря массы, заданная плотность образующегося пенококка и т.д.) использовался метод термического анализа (ТА) согласно ГОСТ Р 53293-2009 «Пожарная опасность веществ и материалов. Материалы, вещества и средства огнезащиты. Идентификация методами термического анализа» и показатель «потеря массы» как наиболее весомый. Также, согласно п. 5.3.3 ГОСТ Р 53295-2009 «Средства огнезащиты для стальных конструкций. Общие требования. Метод определения огнезащитной эффективности», перед применением средства огнезащиты должна быть проведена его идентификация. Экспериментальная идентификация средства огнезащиты проводилась с помощью аппаратуры термического анализа в соответствии с ГОСТ Р 53293-2009.

### Термический анализ

Для проведения ТА использовался модульный термический анализатор марки SETSYS evolution TG-DSC/DTA 1750 производства компании SETARAM (Франция).

Образцы подвергались равномерному нагреву в воздушной атмосфере до температуры 1100 °С со скоростью 15 °С/мин, охлаждение реализовано со скоростью 30 °С/мин.

Рекомендуемое количество параллельных испытаний — согласно ГОСТ Р 53293–2009. Исследовались образцы под № 5–8, поскольку они характеризовались явно выраженной многоступенчатой потерей массы, что характерно для многокомпонентных систем, обладали наименьшей потерей массы при высокой кратности вспучивания (не менее чем в 30 раз по сравнению с первоначальной толщиной покрытия огнезащитной сетки (рис. 3)).

На рис. 3 приведены внешний вид образца огнезащитной сетки (образец № 5 на рис. 4) и испытания на кратность вспучивания. Кратность вспучивания измеряли как отношение первоначальной толщины образца к толщине покрытия с пенококсом [23].

На рис. 5 приведены примеры дериватограмм термогравиметрической зависимости (ТГ), температурной зависимости (Т) и результатов дифференциально-термического анализа (ДТА) от времени для

образцов № 5, 6. Зеленая линия — ТГ, красная — Т, синяя — ДТА.

Сохранение работоспособности кабельных линий и методы определения огнезащитной эффективности для кабельных покрытий.

Исследовалась кабельная линия, защищенная огнезащитной сеткой «ПРОМИЗОЛ-СТК-30» на базе композиции «Кабель» (образец № 5) в четырех вариантах:

- 1) кабельная линия, защищенная (обернутая) сеткой в один слой;
- 2) кабельная линия, защищенная сеткой в два слоя;
- 3) кабельная линия, защищенная сеткой в три слоя;
- 4) кабельная линия, защищенная сеткой в пять слоев.

Проведены исследования кабеля, защищенного сеткой по ГОСТ Р 53311–2009 «Покрытия кабельные огнезащитные. Методы определения огнезащитной эффективности». На отрезок кабеля марки АВВГ 4×10-1 длиной 3100 ± 100 мм с одной стороны наносили огнезащитную сетку на длину 1500 ± 100 мм. Нанесение огнезащитного кабельного покрытия на кабель и его сушку осуществляли в соответствии с технической документацией на покрытие.

При проведении сравнительных испытаний кабельных коробов, предназначенных для сохранения



Рис. 3. Внешний вид образца сетки (№ 5) и испытания на кратность вспучивания

Fig.3. Appearance of net sample (No. 5) and test for swelling multiplicity

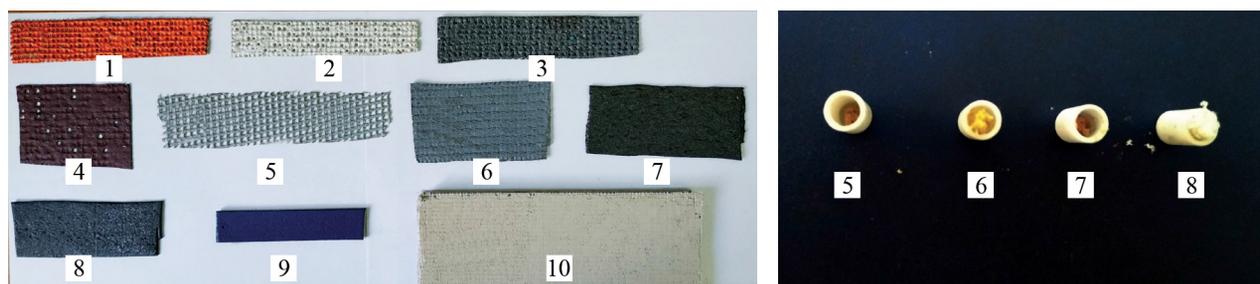


Рис. 4. Образцы огнезащитной сетки № 1–10 с вариациями количества и цвета пигментов, плотности, размеров ячеек (слева) и образцы тиглей с коксовым остатком образцов № 5–8 (справа)

Fig. 4. Fire-protection net samples Nos. 1–10 with variety of quantity and color of pigments, density, mesh size (left) and sampling firepots with coke residue of samples Nos. 5–8 (right)

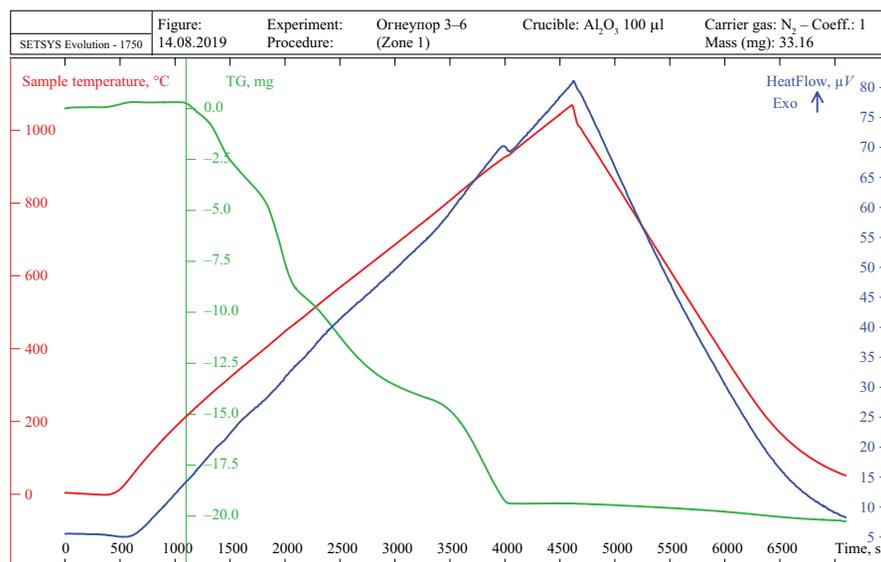
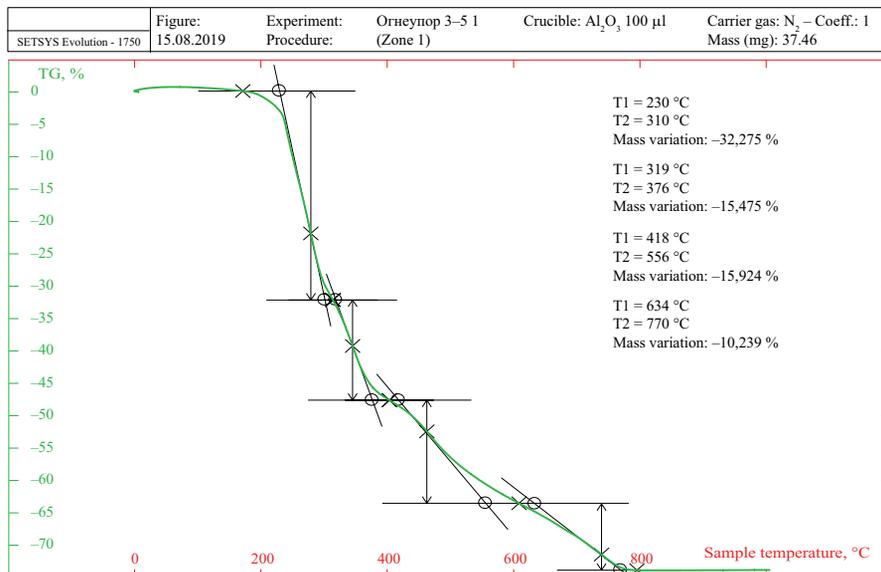
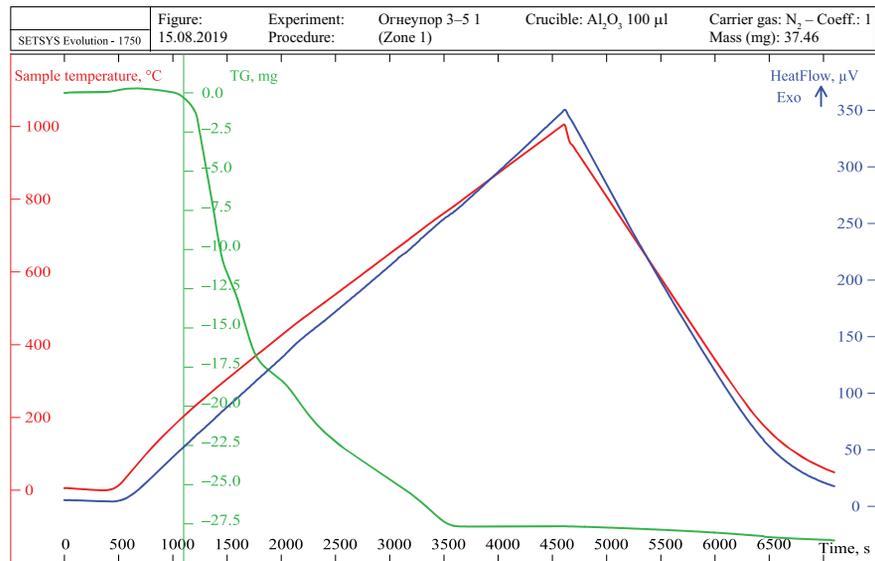


Рис. 5. Дериватограммы образцов № 5, 6

Fig. 5. Thermograms Nos. 5, 6

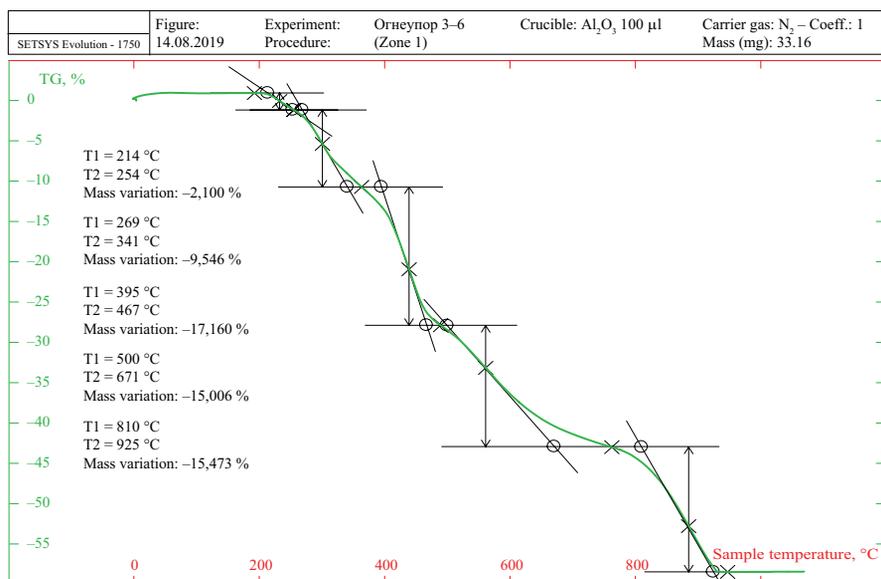


Рис. 5 (окончание). Дериватограммы образцов № 5, 6

Fig. 5 (end). Thermograms Nos. 5, 6

работоспособности кабельной линии в условиях пожара, в каждом варианте короба с огнезащитой прокладывали кабели согласно ГОСТ Р 53316–2009 «Кабельные линии. Сохранение работоспособности в условиях пожара. Метод испытания». При обертывании сеткой кабеля, кабельной линии или лотка необходимо придерживаться формы укладки согласно схеме, изображенной на рис. 6.

Время воздействия стандартного температурного режима должно быть установлено в технической документации. Образец считают сохраняющим работоспособность в течение установленного времени при испытании, если:

- напряжение приложено в течение всего испытания, т.е. прерыватель цепи не отключается;
- токопроводящая жила не разрушается, т.е. лампа не гаснет;
- значение приращения затухания (для оптических кабельных линий) не превышает максимально допустимого значения.

Огнезащитное кабельное покрытие соответствует требованию по нераспространению горения, если в результате испытаний длина поврежденной пламенем или обугленной части кабельной прокладки с огнезащитным покрытием не превышает 1,5 м согласно ГОСТ Р 53311–2009 «Покрывтия кабельные

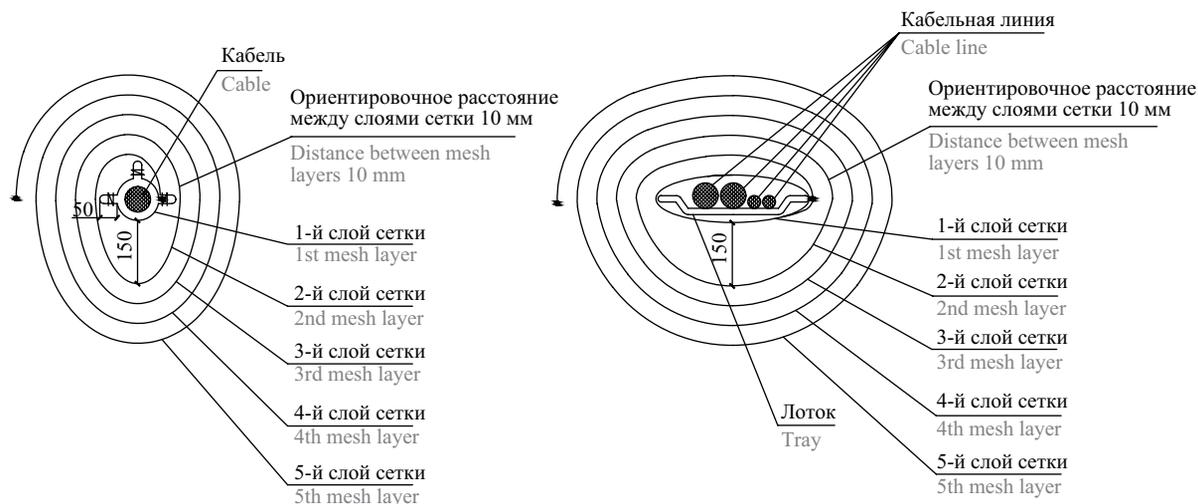


Рис. 6. Схема обертывания сеткой кабеля, кабельной линии, лотка

Fig. 6. Wrapping diagram of cable, cable line, cable tray

огнезащитные. Методы определения огнезащитной эффективности».

**Огнестойкость.** Для конструкций несущих балок предельным состоянием при испытании на огнестойкость согласно п. 8.2 ГОСТ 30247.1–94 «Конструкции строительные. Методы испытаний на огнестойкость. Несущие и ограждающие конструкции» является потеря несущей способности  $R$  вследствие обрушения конструкции или возникновения предельных деформаций. Для изгибаемых конструкций следует считать, что предельное состояние наступило, если прогиб достиг величины  $L/20$  или скорость нарастания деформаций достигла значения  $L^2/(9000h)$  см/мин, где  $L$  — длина пролета, см;  $h$  — расчетная высота сечения конструкции, см.

Испытывались две балки с различными характеристиками с огнезащитной сеткой ПРОМИЗОЛ-МЕТ-30 с поверхностной плотностью 1 и 2 кг/м<sup>2</sup>.

**Огнезащитная эффективность.** Для определения огнезащитной эффективности испытания проводились по методу, изложенному в ГОСТ 53295–2009, без статической нагрузки, при четырехстороннем тепловом воздействии до наступления предельного состояния опытного образца.

За предельное состояние принималось достижение металлом опытного образца критической температуры, равной 500 °С (среднее значение по показаниям трех термопар). В качестве образцов, на которые монтировалось средство огнезащиты, использовались стальные колонны двутаврового сечения профиля № 20 по ГОСТ 8239–89 «Двутавры стальные горячекатаные. Сортамент» или профиля № 20Б1 по ГОСТ 26020–83 «Двутавры стальные горячекатаные с параллельными гранями полок. Сортамент». Приведенная толщина металла: отношение площади поперечного сечения конструкции к периметру ее обогреваемой поверхности.

### Результаты и обсуждение

Для различных объектов защиты (кабель, стальные конструкции) разработаны несколько рецептов и технологических приемов, позволяющих получать различные результаты согласно стандартным методам испытаний.

**Термический анализ.** В табл. 1 представлены температуры разложения по ступеням и потеря массы по каждому отрезку в соответствии

**Таблица 1.** Сводные результаты термического анализа образцов № 5–8

**Table 1.** Summary of results of the thermal analysis of samples Nos. 5–8

Номер образца Sample number	Номер ступени потери массы Mass loss stage number	Температура начала потери массы, °С Mass loss onset temperature, °C	Температура окончания потери массы конца, °С Mass loss finish temperature, °C	Потеря массы, % Mass loss, %	Общая потеря массы, % Total mass loss, %
5	1	235	315	32,3	73,9
	2	324	381	15,5	
	3	423	561	15,9	
	4	639	775	10,2	
6	1	219	259	2,1	59,3
	2	274	346	9,5	
	3	400	472	17,2	
	4	505	676	15	
	5	815	930	15,5	
7	1	229	347	27,9	87,8
	2	409	469	6,3	
	3	472	597	14,8	
	4	682	890	38,8	
8	1	242	355	22,5	71,8
	2	410	476	6,2	
	3	498	652	12,9	
	4	779	963	30,5	

с рис. 5. Например, у образца № 5 при температуре 315 °С наблюдалась максимальная потеря массы и далее поэтапно происходила равномерная потеря массы (до 73,9 %). Образец № 5 использовали для испытаний на кабельных изделиях, поскольку его поверхность не такая плотная (0,5 кг/м<sup>2</sup>) и потеря массы составляет 73,9 %. У образца № 6 обнаружена наименьшая потеря массы (59,3 %), у образца

№ 8 — 71,8 %. Сетки с такими композициями (преимущественно на основе композиции № 6) в дальнейшем применяли для защиты строительных конструкций при огневых испытаниях.

В табл. 2 представлены технические характеристики огнезащитного покрытия и результаты испытаний различных видов конструкций (несущие стальные конструкции) и кабельных изделий.

**Таблица 2.** Технические характеристики огнезащитного покрытия и результаты испытаний конструкций и кабельных изделий  
**Table 2.** Specifications of the fire-protection coating and test results of structures and cabling items

Номер образца, наименование и тип огнезащитной сетки Sample number, description and fire-protection net type	Технические характеристики образцов для испытаний Specifications of test samples	Метод испытания и результаты Test method and results
<p>Образец № 5 «Кабель» «ПРОМИЗОЛ-СТК-30». Цвет — светло-серый; плотность — не более 0,5...1,5; количество незаполненных ячеек — 30...50 % Sample No. 5 “Cable” “PROMIZOL-STK-30”. Color – light grey; density — max. 0.5...1.5; quantity of vacant meshes — 30...50 %</p>	<p>1. Кабельный лоток, кабели: АВВГ 2×2,5 - 0,66 (ГОСТ 16442–80). АВВ 4×10-1 (ГОСТ 16442–80). АКВВГ 14×2,5 (ГОСТ 1508–78) 2. Кабели с поливинилхлоридной, полиэтиленовой и резиновой оболочками марок ААШв 3×120-10, ТППэп 50×2×0,4 и КГ 3×50 + 1×16-0,66 1. Cable tray, cables: AVVG 2×2.5 - 0.66 (GOST 16442–80). AVV 4×10-1 (GOST 16442–80). AKVVG 14×2.5 (GOST 1508–78) 2. Cables with PVC, PE and rubber sheaths of types AAShv 3×120-10, TPPep 50×2×0.4 and KG 3×50 + 1×16-0.66</p>	<p>1. Сохраняет работоспособность согласно ГОСТ Р 53316–2009. Предел по сохранению работоспособности в условиях пожара образцов кабельной линии, защищенной огнезащитной сеткой: – не менее 32 мин (1 слой); – не менее 61 мин (2 слоя); – не менее 94 мин (3 слоя); – не менее 151 мин (5 слоев). 2. Нераспространение горения (ГОСТ Р 53311–2009) 1. Retained functionality in accordance with GOST R 53316–2009. The functionality retaining limit in a fire of the cable line samples with fire-protection net protection: – min. 32 min (1 layer); – min. 61 min (2 layers); – min. 94 min (3 layers); – min. 151 min (5 layers). 2. Fire-retardant properties (GOST R 53311–2009)</p>
<p>Образец № 6 «Металл». Цвет — серый, плотность — 1,2 кг/м<sup>2</sup>; количество незаполненных ячеек — не более 30 % Sample No. 6 “Metal”. Color — grey, density — 1.2 kg/m<sup>2</sup>; vacant mesh number — max 30 %</p>	<p>Стальная колонна, приведенная толщина металла — 2,0 мм; Стальная колонна, приведенная толщина металла — 2,4 мм Steel column, steel thickness (reduced) — 2.0 mm; Steel column, steel thickness (reduced) — 2.4 mm</p>	<p>3. Огнезащитная эффективность (время достижения предельного состояния 500 °С) согласно ГОСТ 53295–2009: – 15 мин (1 слой); – 45 мин (2 слоя) 3. Fire-protection efficiency (time to the limit condition of 500 °C) as per GOST 53295–2009: – 15 min (1 layer); – 45 min (2 layers)</p>
<p>Образец № 6 «Металл» ПРОМИЗОЛ-СТК-Мет. 2.0. Цвет — серый; плотность — 2 кг/м<sup>2</sup>; количество незаполненных ячеек — не более 20 % Sample No. 6 “Metal” PROMIZOL-STK-Met. 2.0. Color — grey; density — 2 kg/m<sup>2</sup>; vacant mesh number — max 20 %</p>	<p>Стальная колонна, приведенная толщина металла — 3,4 мм Steel column, steel thickness (reduced) — 3.4 mm</p>	<p>4. Огнезащитная эффективность (время достижения предельного состояния при температуре 500 °С по ГОСТ 53295–2009) — 45 мин (2 слоя) 4. Fire-protection efficiency (time to the limit condition of 500 °C as per GOST 53295–2009) — 45 min (2 layers)</p>

Номер образца, наименование и тип огнезащитной сетки Sample number, description and fire-protection net type	Технические характеристики образцов для испытаний Specifications of test samples	Метод испытания и результаты Test method and results
Образец № 8 «Металл» ПРОМИЗОЛ-СТК-Мет 1,0. Цвет — темно-серый; плотность — 1,1 кг/м <sup>2</sup> . Количество незаполненных ячеек — не более 20 % Sample No. 8 “Metal” PROMIZOL-STK-Met 1.0. Color — dark grey; density — 1.1 kg/m <sup>2</sup> . Vacant mesh number — max 20 %	Стальная балка, двутавр № 20Б1 АСЧМ 20-93, приведенная толщина металла — 3,4 мм. Статическая нагрузка — 68,67 кН (7000 кгс) Steel beam, I-beam No. 20B1 ASChM 20-93, steel thickness (reduced) — 3.4 mm. Static load — 68.67 kN (7,000 kgf)	5. Огнестойкость R15 в результате достижения скорости нарастания деформации более 0,5 см/мин, предельного прогиба более 150 мм и последующего разрушения образцов (ГОСТ 30247.1–94) 5. Fire-resistance rating R15 based on the achieved deformation growth rate above 0.5 cm/min, above 150 mm limit sag value and subsequent sample destruction (GOST 30247.1–94)
Образец № 8 «Металл» ПРОМИЗОЛ-СТК-Мет 2,0. Цвет — темно-серый; плотность — 2 кг/м <sup>2</sup> , количество незаполненных ячеек — не более 20 % Sample No. 8 “Metal” PROMIZOL-STK-Met 2.0. Color — dark grey; density — 2 kg/m <sup>2</sup> , vacant mesh number — max 20 %	Стальная балка, двутавр № 30Б АСЧМ 20-93, приведенная толщина металла — 4,3 мм. Статическая нагрузка — 81,63 кН (8321 кгс) Steel beam, I-beam No. 30B ASChM 20-93, steel thickness (reduced) — 4.3 mm. Static load — 81.63 kN (8,321 kgf)	6. Огнестойкость R60 в результате возникновения предельных деформаций: предельный прогиб в середине пролета — 200 мм, скорость нарастания деформации — более 0,33 см/мин (ГОСТ 30247.194) 6. Fire-resistance rating R60 based on the limit deformation values: limit sag value in the middle of the flight — 200 mm, deformation growth rate — above 0.33 cm/min (GOST 30247.1–94)

Как следует из полученных данных (см. табл. 2), образец № 5 с поверхностной плотностью 0,5 % и наполненностью ячеек до 50 % наиболее подходит для защиты кабельных изделий: сетка должна быть достаточно открытой, чтобы кабель надежно не перегревался при эксплуатации. Образцы № 6–8 с различной поверхностной плотностью и количеством слоев огнезащиты (один или два слоя сетки) испытывались на строительных конструкциях (двутавровых балках и колоннах).

Проведены испытания огнезащитной эффективности колонн с огнезащитной сеткой, у которых приведенная толщина металла, характерная для легких стальных тонкостенных конструкций (ЛСТК), составляет 2 и 2,4 мм, что позволяет рекомендовать изгибаемое огнезащитное покрытие для этого сегмента конструкций. Исследования в данном направлении сейчас продолжают во Всероссийском ордена «Знак Почета» научно-исследовательском институте противопожарной обороны МЧС России (ФГБУ ВНИИПО МЧС России) непосредственно с использованием профилей ЛСТК различного вида.

Проведены испытания на огнестойкость балок с огнезащитной сеткой и приведенной толщиной 3,4 и 4,3 мм, нагруженных соответственно 68,67 и 81,63 кН. Результаты достигнуты за счет увеличения поверхностной плотности сетки и более на-

полненной композиции в ячейках (снижение количества незаполненных ячеек).

Подготовка к испытаниям и огневое воздействие на двутавровую балку № 30Б1 АСЧМ 20-93 с огнезащитной изгибаемой сеткой приведены на рис. 7.

Кривые изменения температур в огневой камере печи и роста прогибов опытных образцов стальной двутавровой балки № 30Б1 АСЧМ 20-93 с огнезащитной сеткой ПРОМИЗОЛ-СТК-Мет-2,0 представлены на рис. 8.

За время проведения испытаний опытных образцов стальной двутавровой балки с огнезащитной сеткой зафиксированы следующие характерные особенности их поведения. На 5...8-й минутах начинается термическое расширение огнезащитного покрытия, нанесенного на сетку, на 45...50-й минутах наблюдается побеление вспученного слоя покрытия. На 64-й минуте испытания образца № 1 и на 66-й минуте испытания образца № 2 опытные образцы перешли в предельное состояние (достижение скорости нарастания деформации — более 0,33 см/мин, предельный прогиб — более 200 мм), характеризующееся быстрым нарастанием прогиба и последующим обрушением опытных образцов (рис. 9).

В результате исследований получены сертифицированные решения для огнезащиты различных



Рис. 7. Подготовка к испытаниям балки с огнезащитной изгибаемой сеткой и вид в смотровое окно на 5-й минуте испытания опытного образца № 1

Fig. 7. Test preparation of a wrapped beam and sight-glass view in the 5th minute of No. 1 sample testing

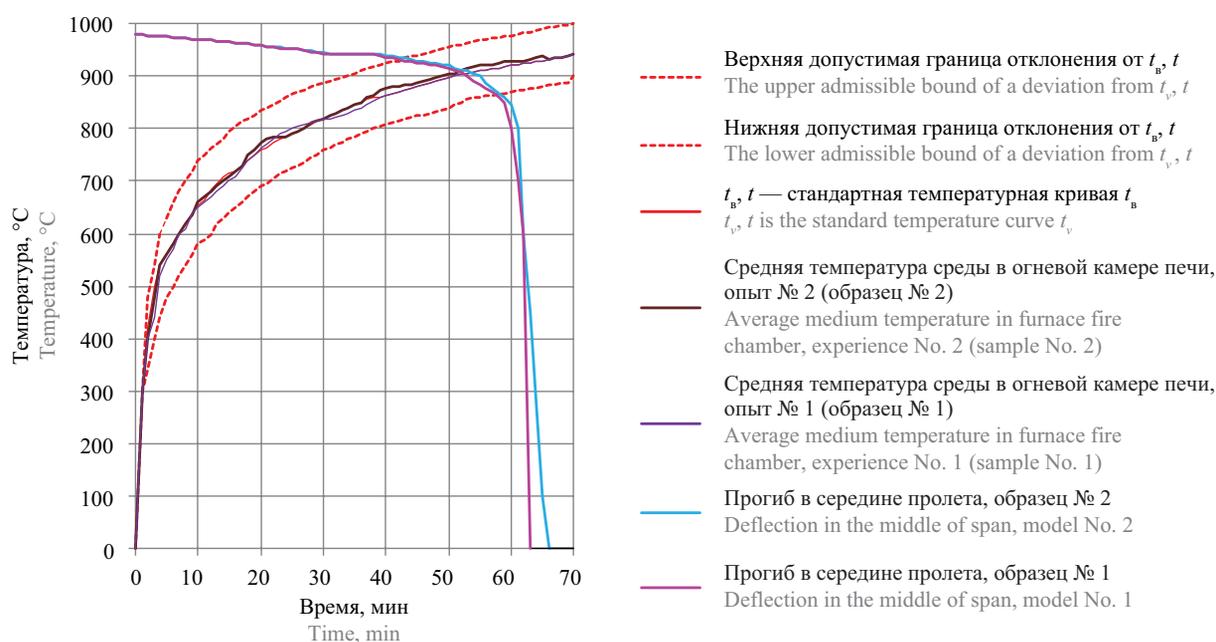


Рис. 8. Графики изменения температуры в огневой камере печи и роста прогибов опытных образцов с огнезащитной сеткой ПРОМИЗОЛ-СТК-Мет-2,0

Fig. 8. Furnace fire-chamber temperature vs. sag growth diagram of test samples with PROMIZOL-STK-Met-2.0 fire-protection net



Рис. 9. Достижение опытными образцами № 1 (слева) и № 2 (справа) предельного состояния по несущей способности конструкции ( $R$ )

Fig. 9. Sample No. 1 (left) and No. 2 (right) which reached the limit condition in terms of the carrier capacity of the structure ( $R$ )

изделий и строительных конструкций. На рис. 10 приведены некоторые виды применения огнезащитной сетки для стальных конструкций, в том числе при эксплуатации в морском климате.

На конструкциях объектов проводилась огнезащитная обработка связевых сочленений, связей (серый цвет сетки) и защита ферм покрытия (черный и белый цвет).

На рис. 11 представлены различные решения для кабельных изделий с использованием изгибаемой огнезащиты: защита кабельной прокладки на полках; монтаж на вертикальный неплотный поток кабелей; монтаж на кабельный короб с внешними выводами из него кабелей и на имитацию вертикального вентиляционного короба.

### Заключение

Разработан и внедрен в серийное производство новый вид огнезащиты для строительных конструкций, сочетающий признаки конструктивной и интумесцентной огнезащиты, — конструктивная изгибаемая (рулонная) интумесцентная огнезащита. Материал предназначен для снижения пожарной опасности кабельных изделий и повышения пределов огнестойкости строительных конструкций.

По сравнению с традиционными средствами огнезащиты изгибаемая интумесцентная огнезащита, представляющая собой морозостойкую полимерную композицию на негорючей сетчатой основе, обладает следующими преимуществами и перспективами применения:

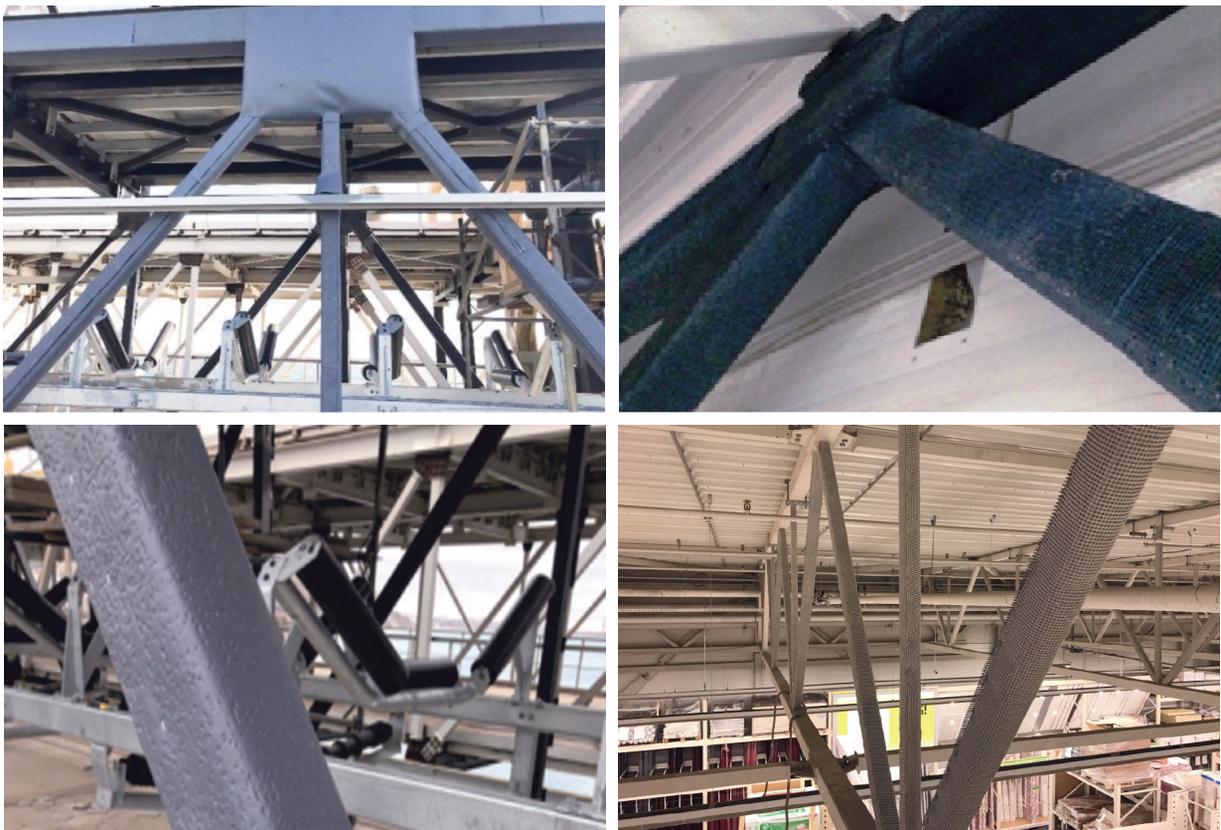
- совместимость со всеми ранее нанесенными огнезащитными или антикоррозионными покрытиями на стальные конструкции, поскольку сетка бесконтактно оборачивается вокруг поверхности конструкции;

- монтаж, эксплуатация и ремонт при температурах от  $-60$  до  $90$  °С (в таких условиях большинство огнезащитных покрытий уже теряют эксплуатационные свойства), влажности 100 %, наличии осадков и порывов ветра, допускающих работу согласно требованиям техники безопасности труда;

- простота периодического или контрольного осмотра стальных конструкций, с последующим восстановлением огнезащитного покрытия;

- возможность проектирования огнезащиты легких стальных тонкостенных конструкций за счет малого веса и занимаемого объема;

- широкий диапазон исполнения в ненасыщенных цветах для решения различных архитектурно-эстетических задач.



**Рис. 10.** Защищенные рулонной сеткой стальные конструкции, в том числе и для наружной эксплуатации в морском климате  
**Fig. 10.** Steel structures protected with roll net, also for outdoor operation in maritime climate



**Рис. 11.** Монтаж огнезащитной сетки на кабельный поток и кабельный короб

**Fig. 11.** Installation of the fire-protection net on a cable tray and a cable conduit

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Гравит М.В., Прусаков В.А., Симоненко Я.Б.* Изгибаемая конструктивная интумесцентная (3D) огнезащита для строительных конструкций // Актуальные проблемы пожарной безопасности : мат. XXXI Междунар. науч.-практ. конф. М. : ВНИИПО, 2019. С. 63–68.
2. *Morys M., Illerhaus B., Sturm H., Scharfel B.* Variation of intumescent coatings revealing different modes of action for good protection performance // *Fire Technology*. 2017. Vol. 53. Pp. 1569–1587. DOI: 10.1007/s10694-017-0649-z
3. *Kang J., Takahashi F., T'ien J.S.* Computer tomography based structure characterization of expanded intumescent coatings for fire protection // *Fire Technology*. 2019. Vol. 55. Pp. 689–712. DOI: 10.1007/s10694-018-0796-x
4. *Vasilchenko A., Otrosh Yu., Adamenko N., Doronin E., Kovalov A.* Feature of fire resistance calculation of steel structures with intumescent coating // *MATEC Web of Conferences*. 2018. Vol. 230. P. 02036. DOI: 10.1051/mateconf/201823002036
5. *Qin S., Pour M.G., Lazar S., Wagberg L., Grunlan J.C., Song Y. et al.* Super gas barrier and fire resistance of nanoplatelet/nanofibril multilayer thin films // *Advanced Materials Interfaces*. 2018. DOI: 10.1002/admi.201801424
6. *Schaumann P., Kirsch T.* Protected steel and composite connections: simulation of the mechanical behaviour of steel and composite connections protected by intumescent coating in fire // *Journal of Structural Fire Engineering*. 2015. Vol. 6. Issue 1. Pp. 41–48. DOI: 10.1260/2040-2317.6.1.41
7. *Puspitasari W.C., Ahmad F., Ullah S., Hussain P., Megat-Yusoff P.S.M., Masset P.J.* The study of adhesion between steel substrate, primer, and char of intumescent fire retardant coating // *Progress in Organic Coatings*. 2019. Vol. 127. Pp. 181–193. DOI: 10.1016/j.porgcoat.2018.11.015
8. *Kaledin V.I., Mitkevich A.B., Strakhov V.L.* Numerical estimation of fire resistance and a flexible design of fire protection for structures made of reinforced materials // *Mechanics of Composite Materials*. 2012. Vol. 48. Pp. 313–324. DOI: 10.1007/s11029-012-9278-2
9. *Голованов В.И., Павлов В.В., Пехотиков А.В.* Оценка качества нанесения средств огнезащиты на стальные конструкции зданий и сооружений различного функционального назначения // *Пожарная безопасность*. 2015. № 3. С. 74–82.
10. *Gravit M., Simonenko Ya., Yablonskii L.* 3D-flexible intumescent fire protection mesh for building structures // *E3S Web of Conferences*. 2019. Vol. 91. P. 02004. DOI: 10.1051/e3sconf/20199102004

11. Tomakhova A., Zybina O., Suprun V., Babkin O. Development of led-curable intumescent polymer coatings for fire protection of building constructions // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. 2019. Vol. 666. P. 012089. DOI: 10.1088/1757-899X/666/1/012089
12. Крутоланов А.С. Разработка огнепреграждающих сеточных экранов со вспенивающимися эпоксидными покрытиями и перекрывающимися пенококсом ячейками в условиях пожара : дис. ... канд. техн. наук. СПб., 2002. 134 с.
13. Гравит М.В., Недрышкин О.В., Бардин А.В. Повышение пределов огнестойкости строительных конструкций нефтегазового комплекса при углеводородном режиме пожара // Труды 13-й Международной выставки и конференции по освоению ресурсов нефти и газа Российской Арктики и континентального шельфа стран СНГ (RAO/CIS OFFSHORE). СПб. : ХИМИЗДАТ, 2017. С. 448.
14. Minkin D.Y., Mironchev A.V., Tursenev S.A. Technologies of maintaining fire safety of the offshore oil and gas fields facilities // Pollution Research. 2017. Vol. 36. Issue 3. Pp. 640–644.
15. Nolan D.P. Handbook of fire and explosion protection engineering principles for oil, gas, chemical and related facilities. Gulf Professional Publ., 2011. 340 p. DOI: 10.1016/C2009-0-64221-5
16. Gravit M., Gumerova E., Bardin A., Lukinov V. Increase of fire resistance limits of building structures of oil-and-gas complex under hydrocarbon fire // International Scientific Conference Energy Management of Municipal Transportation Facilities and Transport. 2018. Pp. 818–829. DOI: 10.1007/978-3-319-70987-1\_87
17. Дринберг А.С., Гравит М.В., Зыбина О.А. Огнезащита конструкций интумесцентными лакокрасочными материалами при углеводородном режиме пожара // Лакокрасочные материалы и их применение. 2018. № 1–2. С. 44–49.
18. Абрамов И.В., Гравит М.В., Гумерова Э.И. Повышение пределов огнестойкости судовых и строительных конструкций при углеводородном температурном режиме // Газовая промышленность. 2018. № 5. С. 106–115.
19. Fox D.M., Cho W., Dubrulle L., Grützmacher P.G., Zammarano M. Intumescent polydopamine coatings for fire protection // Green Materials. 2020. DOI: 10.1680/jgrma.19.00065
20. Jensen J.L., Narasimhan H., Giuliani L., Jomaas G. Development of fire protection for bridge cable systems // ce/papers. 2019. Vol. 3. Issue 3–4. Pp. 671–676. DOI: 10.1002/cepa.1119
21. Triantafyllidis Z., Bisby L.A. Fibre-reinforced intumescent fire protection coatings as a confining material for concrete columns // Construction and Building Materials. 2020. Vol. 231. P. 117085. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2019.117085
22. Гравит М.В. Оценка порового пространства пенококса огнезащитных вспучивающихся покрытий // Пожаровзрывобезопасность/Fire and Explosion Safety. 2013. Т. 22. № 5. С. 33–37.

## REFERENCES

1. Gravit M.V., Prusakov V.A., Simonenko Ya.B. Bending constructional intumescent (3D) fire protection for building structures. *Actual Problems of Fire Safety : Materials of the XXXI International Scientific and Practical Conference*. Moscow, VNIPO Publ., 2019; 63-68. (rus.).
2. Morys M., Illerhaus B., Sturm H., Schartel B. Variation of intumescent coatings revealing different modes of action for good protection performance. *Fire Technology*. 2017; 53:1569-1587. DOI: 10.1007/s10694-017-0649-z
3. Kang J., Takahashi F., T'ien J.S. Computer tomography based structure characterization of expanded intumescent coatings for fire protection. *Fire Technology*. 2019; 55:689-712. DOI: 10.1007/s10694-018-0796-x
4. Vasilchenko A., Otrosh Yu., Adamenko N., Doronin E., Kovalov A. Feature of fire resistance calculation of steel structures with intumescent coating. *MATEC Web of Conferences*. 2018; 230:02036. DOI: 10.1051/mateconf/201823002036
5. Qin S., Pour M.G., Lazar S., Wagberg L., Grunlan J.C., Song Y. et al. Super gas barrier and fire resistance of nanoplatelet/nanofibril multilayer thin films. *Advanced Materials Interfaces*. 2018. DOI: 10.1002/admi.201801424
6. Schaumann P., Kirsch T. Protected steel and composite connections: simulation of the mechanical behaviour of steel and composite connections protected by intumescent coating in fire. *Journal of Structural Fire Engineering*. 2015; 6(1):41-48. DOI: 10.1260/2040-2317.6.1.41
7. Puspitasari W.C., Ahmad F., Ullah S., Hussain P., Megat-Yusoff P.S.M., Masset P.J. The study of adhesion between steel substrate, primer, and char of intumescent fire retardant coating. *Progress in Organic Coatings*. 2019; 127:181-193. DOI: 10.1016/j.porgcoat.2018.11.015
8. Kaledin V.I., Mitkevich A.B., Strakhov V.L. Numerical estimation of fire resistance and a flexible design of fire protection for structures made of reinforced materials. *Mechanics of Composite Materials*. 2012; 48:313-324. DOI: 10.1007/s11029-012-9278-2
9. Golovanov V.I., Pavlov V.V., Pekhotikov A.V. Assessment of quality application of fire protection means on steel constructions of buildings and structures of various functional purposes. *Fire safety*. 2015; 3:74-82. (rus.).
10. Gravit M., Simonenko Ya., Yablonskii L. 3D-flexible intumescent fire protection mesh for building structures. *E3S Web of Conferences*. 2019; 91:02004. DOI: 10.1051/e3sconf/20199102004
11. Tomakhova A., Zybina O., Suprun V., Babkin O. Development of led-curable intumescent polymer coatings for fire protection of building constructions. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*. 2019; 666:012089. DOI: 10.1088/1757-899X/666/1/012089

12. Krutolapov A.S. *Development of fire-retardant mesh screens with foaming epoxy coatings and overlapping penox cells in a fire : dis. ... cand. tech. sciences.* St. Petersburg, 2002; 134. (rus.).
13. Gravit M.V., Nedryshkin O.V., Bardin A.V. Increasing fire resistance limits of building structures of oil and gas complex during the hydrocarbon fire mode. *Works of the 13th International Exhibition and Conference on Oil and Gas Resources Development of the Russian Arctic and CIS Continental Shelf (RAO/CIS OFFSHORE).* St. Petersburg, CHIMIZDAT Publ., 2017; 448. (rus.).
14. Minkin D.Y., Mironchev A.V., Tursenev S.A. Technologies of maintaining fire safety of the offshore oil and gas fields facilities. *Pollution Research.* 2017; 36(3):640-644.
15. Nolan D.P. *Handbook of Fire and Explosion Protection Engineering Principles for Oil, Gas, Chemical and Related Facilities.* Gulf Professional Publ., 2011; 340. DOI: 10.1016/C2009-0-64221-5
16. Gravit M., Gumerova E., Bardin A., Lukinov V. Increase of fire resistance limits of building structures of oil-and-gas complex under hydrocarbon fire. *International Scientific Conference Energy Management of Municipal Transportation Facilities and Transport.* 2018; 818-829. DOI: 10.1007/978-3-319-70987-1\_87
17. Drinberg A.S., Gravit M.V., Zybina O.A. Fire protection with intumescent coatings under the hydrocarbon fire conditions. *Russian Coatings Journal.* 2018; 1-2:44-49. (rus.).
18. Abramov I.V., Gravit M.V., Gumerova E.I. Increase in the fire resistance limits of ship and building structures with hydrocarbon fire. *Gas Industry Magazine.* 2018; 5:106-115. (rus.).
19. Fox D.M., Cho W., Dubrulle L., Grützmacher P.G., Zammarano M. Intumescent polydopamine coatings for fire protection. *Green Materials.* 2020. DOI: 10.1680/jgrma.19.00065
20. Jensen J.L., Narasimhan H., Giuliani L., Jomaas G. Development of fire protection for bridge cable systems. *ce/papers.* 2019; 3(3-4):671-676. DOI: 10.1002/cepa.1119
21. Triantafyllidis Z., Bisby L.A. Fibre-reinforced intumescent fire protection coatings as a confining material for concrete columns. *Construction and Building Materials.* 2020; 231:117085. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2019.117085
22. Gravit M.V. Evaluation of pore space form of intumescent fire retardant coating. *Pozharovzryvobezopasnost/Fire and Explosion Safety.* 2013; 22(5):33-37. (rus.).

Поступила 26.03.2020, после доработки 20.04.2020;

принята к публикации 17.05.2020

Received March 26, 2020; Received in revised form April 20, 2020;

Accepted May 17, 2020

### Информация об авторах

**ГРАВИТ Марина Викторовна**, канд. техн. наук, доцент Высшей школы промышленно-гражданского и дорожного строительства, Инженерно-строительный институт, Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого, г. Санкт-Петербург, Российская Федерация; Author ID: 667288; ResearcherID: B-4397-2014; ORCID: 0000-0003-1071-427X; e-mail: marina.gravit@mail.ru

**ПРУСАКОВ Василий Алексеевич**, технический директор, ООО «ПРОМИЗОЛ», г. Люберцы, Московская обл., Российская Федерация; ORCID: 0000-0003-4720-2024; e-mail: info@tdpromizol.com

**КОРОТИН Игорь Германович**, генеральный директор, АО «Унихимтек», г. Подольск, Московская обл., Российская Федерация; ORCID: 0000-0001-9406-7887; e-mail: korotin@ograh.ru

**ТИМОФЕЕВ Николай Сергеевич**, директор по маркетингу, ООО «ПРОМИЗОЛ», г. Люберцы, Московская обл., Российская Федерация; ORCID: 0000-0002-7484-7226; e-mail: info@tdpromizol.com

**СИМОНЕНКО Яна Борисовна**, студентка, Инженерно-строительный институт, Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого, г. Санкт-Петербург, Российская Федерация; ORCID: 0000-0003-3123-6350; e-mail: YannaSimnna98@mail.ru

### Information about the authors

**Marina V. GRAVIT**, Cand. Sci. (Eng.), Associate Professor, Institute of Civil Engineering, Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University, Saint Petersburg, Russian Federation; Author ID: 667288; ResearcherID: B-4397-2014; ORCID: 0000-0003-1071-427X; e-mail: marina.gravit@mail.ru

**Vasily A. PRUSAKOV**, Technical Director, "PROMIZOL" Ltd, Lyubertsy, Moscow Region, Russian Federation; ORCID: 0000-0003-4720-2024; e-mail: info@tdpromizol.com

**Igor G. KOROTIN**, General Director, "UNICHIMTEK" JSC, Podolsk, Moscow Region, Russian Federation, ORCID: 0000-0001-9406-7887; e-mail: korotin@ograh.ru

**Nikolay S. TIMOFEEV**, Marketing Director, "PROMIZOL" Ltd, Lyubertsy, Moscow Region, Russian Federation; ORCID: 0000-0002-7484-7226; e-mail: info@tdpromizol.com

**Yana B. SIMONENKO**, Student, Institute of Civil Engineering, Peter the Great Saint Petersburg Polytechnic University, Saint Petersburg, Russian Federation; ORCID: 0000-0003-3123-6350; e-mail: YannaSimnna98@mail.ru

## Об уточненной оценке координат очага пожара в помещении

© Л.Т. Танклевский<sup>1</sup>, И.А. Бабилов<sup>1</sup>, А.А. Таранцев<sup>2,3</sup>✉, О.А. Зыбина<sup>1</sup>

- 1 Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого (Россия, 195251, г. Санкт-Петербург, ул. Политехническая, 29)
- 2 Институт проблем транспорта им. Н.С. Соломенко Российской академии наук (Россия, 199178, г. Санкт-Петербург, 12-я Линия ВО, 13)
- 3 Санкт-Петербургский университет Государственной противопожарной службы МЧС России (Россия, 196105, г. Санкт-Петербург, Московский просп., 149)

### АННОТАЦИЯ

**Введение.** Проблема быстрого определения координат пожара в помещении является весьма актуальной для своевременного осуществления принудительной активации оросителей. Решению данной проблемы посвящен ряд работ, в частности приведен способ графоаналитического определения координат  $(x_0, y_0)$  очага пожара в помещении.

**Теоретическая часть.** Разработанный авторами метод дает возможность определить координаты пожара благодаря показаниям  $N$  термодатчиков. Метод обладает следующими особенностями:

а) основывается на модели пожара, полученной Р. Альпертом для помещений, и свидетельствует о том, что нужно учитывать не просто температуру, фиксируемую термодатчиками, а значение этой температуры в *третьей степени*;

б) позволяет определить координаты очага пожара не только по приращению температуры, но и по скорости ее роста, причем результат в обоих случаях будет практически одинаковым и не зависящим ни от высоты помещения, ни от времени, ни от формы пожара.

**Компьютерный эксперимент.** Для верификации полученного выражения был проведен компьютерный эксперимент на примере помещения склада. Для двух вариантов пожара А и Б с применением модели Р. Альперта и заданными координатами очагов, используя специально разработанную компьютерную программу, были смоделированы динамика прироста температуры  $\Delta T(t)$  и скорости ее изменения.

**Натурный эксперимент.** В работе приведены результаты натурального эксперимента, при котором были зарегистрированы данные с 16 термопар, показывающие распространение теплового поля пожара. С использованием этих данных в компьютерной программе стало возможным определить координаты пожара, соответствующие реальному местоположению очага.

**Выводы.** На основе полученного выражения можно оперативно, с приемлемой достоверностью определять координаты очага пожара, что позволяет принудительно активировать один, два или три оросителя, которые способны подавить пожар на самой ранней стадии с минимальным количеством расходуемого огнетушащего вещества.

**Ключевые слова:** ороситель; термодатчик; спринклерная автоматическая установка пожаротушения; пожарная безопасность; принудительная активация.

**Для цитирования:** Танклевский Л.Т., Бабилов И.А., Таранцев А.А., Зыбина О.А. Об уточненной оценке координат очага пожара в помещении // Пожаровзрывобезопасность/Fire and Explosion Safety. 2020. Т. 29. № 3. С. 33–43. DOI: 10.22227/PVB.2020.29.03.33-43

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

## On a more precise assessment of coordinates of the seat of fire in the premises

© Leonid T. Tanklevskiy<sup>1</sup>, Igor A. Babikov<sup>1</sup>, Alexander A. Tarantsev<sup>2,3</sup>✉, Olga A. Zyбина<sup>1</sup>

- 1 Peter the Great Saint Petersburg Polytechnic University (Polytechnicheskaya St., 29, Saint Petersburg, 195251, Russian Federation)
- 2 Solomenko's Institute of Transport Problems of the Russian Academy of Sciences (12-ya Liniya VO, 13, Saint Petersburg, 199178, Russian Federation)
- 3 Saint Petersburg University of State Fire Service of Emercom of Russia (Moskovskiy Avenue, 149, Saint Petersburg, 196105, Russian Federation)

### ABSTRACT

**Introduction.** The problem of quick identification of fire coordinates in the premises is particularly relevant electrical activation. A number of authors focus on this problem, in particular, they analyze the method of graphic and analytic positioning  $(x_0, y_0)$  of the fire seat in the premises.

**Theoretical Part.** The method developed by the authors makes it possible to identify the coordinates of a fire by reading  $N$  values of temperature sensors. The method has the following features:

a) it is based on the fire model obtained by R. Alpert for premises, and shows that it is necessary to take into account not just the temperature read by temperature sensors, but the value of this temperature in third power;

b) it allows you to determine the coordinates of the seat of fire, not only by the increase in temperature, but also by the speed of its growth, and the result in both cases will be almost the same and independent of either the height of the premises, or time, or the form of fire.

**Computer Experiment.** To verify the obtained expression, a computer experiment was carried out using the example of a warehouse. For two A and B fire variants using R. Alpert model and the specified coordinates of the fronts, using a specially developed computer program, the dynamics of temperature increase  $\Delta T(t)$  and the rate of its change were simulated.

**Full-Scale Experiment.** The paper presents the results of a full-scale experiment in which data from 16 thermocouples showing the spread of the thermal field of fire were registered. Using this data in the computer program it was possible to set the coordinates of the fire that corresponded to the real location of the seat of fire.

**Conclusions.** On the basis of the obtained expression it is possible to set quickly, with acceptable reliability, the coordinates of the seat of fire, which allows to forcefully activate one, two or three sprinklers that are able to fight the fire at the earliest stage with the minimum flow of fire extinguishing agent.

**Keywords:** sprinkler; temperature sensor; sprinkler automatic fire-fighting system; fire safety; electrical activation

**For citation:** Tanklevskiy L.T., Babikov I.A., Tarantsev A.A., Zybins O.A. On a more precise assessment of coordinates of the seat of fire in the premises. *Pozharovzryvobezopasnost/Fire and Explosion Safety*. 2020; 29(3):33-43. DOI: 10.22227/PVB.2020.29.03.33-43

✉ Alexander Alexeevich Tarantsev, e-mail: info@iptran.ru

## Введение

Спринклерные автоматические установки пожаротушения (АУП)<sup>1</sup> являются важной составляющей противопожарной защиты объектов различных классов функциональной пожарной опасности<sup>2</sup>: складов со стеллажным хранением продукции [1, 2], автостоянок [3, 4], тоннелей [5] и др.

Исторически как в СССР/РФ [6–18], так и за рубежом [19–26] большое внимание уделялось борьбе с пожарами в помещениях, в частности, с использованием АУП.

Как показано в работах [27, 28], чем раньше будет обнаружено возгорание, тем раньше может быть активирована АУП и тем быстрее пожар может быть подавлен без излишнего расходования огнетушащего вещества, которое может являться сопутствующим опасным фактором пожара для защищаемого объекта. Данное условие предопределяет эффективность АУП [29] и пути ее повышения [30], применение новых материалов [31], особенно-сти гидравлических расчетов [32, 33] и др.

В этой связи проблема быстрейшего определения координат очага пожара в помещении является весьма актуальной в целях принудительной активации именно тех оросителей (или даже одного оросителя), на защищаемой площади которых находится этот очаг.

Решению данной проблемы посвящен ряд работ, в частности, в [34] приведен способ графоаналитического определения координат  $(x_o, y_o)$  очага

пожара класса А в помещении, а в работе [35] — выражение для средневзвешенного экспресс-нахождения этих координат по значениям температур  $\{T_i\}$ , получаемых от  $N$  термодатчиков:

$$\begin{bmatrix} x_o \\ y_o \end{bmatrix} = \frac{\sum_{i=1}^N T_i \begin{bmatrix} x_i \\ y_i \end{bmatrix}}{\sum_{i=1}^N T_i}, \quad (1)$$

где  $x_i, y_i$  — координаты  $i$ -го термодатчика.

Тем не менее представляется необходимым разработать уточненный подход к определению координат  $(x_o, y_o)$ , который может быть использован в системе управления принудительным пуском АУП, а также в системе видеоконтроля помещений объекта.

## Теоретическая часть

Уточненный метод определения координат очага пожара должен базироваться на известных адекватных моделях развития пожара [36–40]. По мнению авторов, наиболее приемлемой является модель, представленная в [40], аналитически связывающая приращение температуры  $\Delta T$ , °С, в припотолочной области помещения высотой  $H$ , м, с тепловой мощностью  $Q$ , кВт, очага пожара класса А. В рамках оговоренных там допущений приращение температуры  $\Delta T$  на расстоянии  $R$  от оси конвективной колонки (ее нижняя точка и является центром очага пожара с координатами  $(x_o, y_o)$ ) может быть найдено из выражения:

$$\Delta T = T - T_0 = \frac{5,3472}{H} \left( \frac{Q}{R} \right)^{2/3}, \quad R > 0,179H, \quad (2)$$

где  $T$  и  $T_0$  — соответственно текущая и начальная (до возгорания) температуры в припотолочной

<sup>1</sup> СП 5.13130.2009. Системы противопожарной защиты. Установки пожарной сигнализации и пожаротушения автоматические. Нормы и правила проектирования.

<sup>2</sup> Технический регламент о требованиях пожарной безопасности: Федеральный закон от 22.07.2008 № 123-ФЗ.

области на расстоянии  $R$  от оси конвективной колонки, °С.

Величина  $Q$ , в свою очередь, может быть оценена по выражению:

$$Q = k_{\phi} q (Vt)^m, \quad (3)$$

где  $k_{\phi}$ ,  $m$  — параметры формы площади пожара, при круговой форме пожара  $k_{\phi} = \pi$ ,  $m = 2$ ;

при пожаре в коридоре шириной  $a$   $m = 1$ ,  $k_{\phi} = a$  при распространении пожара в одну сторону,  $k_{\phi} = 2a$  при распространении пожара в обе стороны;

$t$  — текущее время, отсчитываемое от начала возгорания, с;

$q$  — удельная тепловая мощность пожара, кВт/м<sup>2</sup>;

$V$  — линейная скорость распространения фронта пламени, м/с (например, согласно [41], для жилых помещений, гостиниц, общежитий  $q = 184,2$  кВт/м<sup>2</sup>,  $V = 0,0045$  м/с).

С учетом выражений (2) и (3) может быть найдена скорость роста температуры в припотолочной области на расстоянии  $R$  от оси конвективной колонки при  $R > 0,179H$ :

$$\begin{aligned} \frac{dT}{dt} &= 3,5648 \frac{m}{H} \left( \frac{k_{\phi} q V^m}{R} \right)^{2/3} t^{(2m-3)/3} = \\ &= 3,5648 \frac{m}{Ht} \left( \frac{Q}{R} \right)^{2/3}. \end{aligned} \quad (4)$$

В случае пожара круговой формы выражение (4) приводится к виду:

$$\frac{dT}{dt} = \frac{15,2932}{H} \left( \frac{qV^2}{R} \right)^{2/3} t^{1/3} = \frac{7,1296}{Ht} \left( \frac{Q}{R} \right)^{2/3}. \quad (5)$$

Применительно к  $i$ -му термодатчику с координатами  $(x_i, y_i)$  выражения (2) и (4) можно записать в виде:

$$Q_i^2 = R_i^2 \left[ \frac{k_1 \Delta T_i^3}{k_2 \left( \frac{dT}{dt} \right)_i^3} \right], \quad (6)$$

где  $k_1 \approx 0,00654H^3$ ;  $k_2 \approx 0,02207(Ht/m)^3$ ;  
 $= (x_i - x_0)^2 + (y_i - y_0)^2$  — квадрат расстояния от  $i$ -го термодатчика до оси конвективной колонки.

Параметр  $Q_i$  в выражении (6) можно интерпретировать как условную мощность очага пожара, регистрируемую  $i$ -ым термодатчиком, когда он «не знает» координат очага пожара. Выражение (6) можно по аналогии с *методом наименьших квадратов* [42] использовать для определения координат очага пожара  $(x_0, y_0)$  из условия:

$$\begin{aligned} \sum_{i=1}^N Q_i^2 &= \sum_{i=1}^N [(x_i - x_0)^2 + (y_i - y_0)^2] \times \\ &\times \left[ \frac{k_1 \Delta T_i^3}{k_2 \left( \frac{dT}{dt} \right)_i^3} \right] \rightarrow \min \end{aligned} \quad (7)$$

где  $N$  — число учитываемых термодатчиков.

Взяв от (7) частные производные по  $x$  и  $y$ , получаем систему двух уравнений:

$$\begin{cases} \frac{\partial}{\partial x_0} \sum_{i=1}^N Q_i^2 = 2 \sum_{i=1}^N (x_i - x_0) \left[ \frac{k_1 \Delta T_i^3}{k_2 \left( \frac{dT}{dt} \right)_i^3} \right] = \\ = 2 \sum_{i=1}^N x_i \left[ \frac{k_1 \Delta T_i^3}{k_2 \left( \frac{dT}{dt} \right)_i^3} \right] - 2x_0 \sum_{i=1}^N \left[ \frac{k_1 \Delta T_i^3}{k_2 \left( \frac{dT}{dt} \right)_i^3} \right]; \\ \frac{\partial}{\partial y_0} \sum_{i=1}^N Q_i^2 = 2 \sum_{i=1}^N (y_i - y_0) \left[ \frac{k_1 \Delta T_i^3}{k_2 \left( \frac{dT}{dt} \right)_i^3} \right] = \\ = 2 \sum_{i=1}^N y_i \left[ \frac{k_1 \Delta T_i^3}{k_2 \left( \frac{dT}{dt} \right)_i^3} \right] - 2y_0 \sum_{i=1}^N \left[ \frac{k_1 \Delta T_i^3}{k_2 \left( \frac{dT}{dt} \right)_i^3} \right]. \end{cases} \quad (8)$$

Приравняв (8) и (9) к нулю и решив относительно  $x_0$  и  $y_0$ , получаем:

$$\begin{bmatrix} x_0 \\ y_0 \end{bmatrix} = \frac{\sum_{i=1}^N \begin{bmatrix} x_i \\ y_i \end{bmatrix} \left[ \Delta T_i^3; \left( \frac{dT}{dt} \right)_i^3 \right]}{\sum_{i=1}^N \left[ \Delta T_i^3; \left( \frac{dT}{dt} \right)_i^3 \right]}. \quad (10)$$

Выражение (10), как нетрудно увидеть, является уточняющим развитием известного выражения (1) и имеет следующие особенности:

а) основывается на модели пожара, полученной Р. Альпертом [40] для помещений, и свидетельствует о том, что нужно не просто учитывать температуру термодатчиков, а их температуру в *третьей степени*;

б) позволяет определить координаты очага пожара не только по приращению температуры, но и по скорости ее роста, причем результат в обоих случаях будет практически одинаковым и не зависящим ни от высоты помещения (важно только выполнение условия  $R > 0,179H$ ), ни от времени, ни от формы пожара.

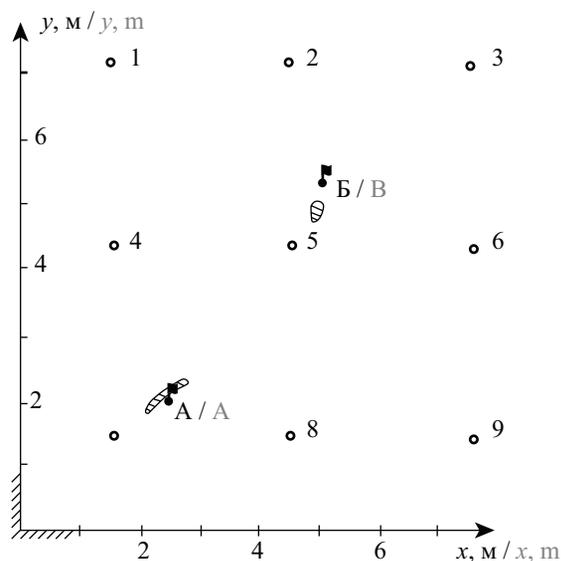
### Компьютерный эксперимент

Для верификации выражения (10) был проведен компьютерный эксперимент на примере помещения склада ( $q = 372,8$  кВт/м<sup>2</sup>;  $V = 0,01$  м/с) высо-

**Таблица 1.** Координаты термодатчиков и расстояния от них до осей конвективных колонок при вариантах пожара А и Б  
**Table 1.** Coordinates of temperature sensors and distances from them to the axes of convective columns in fire variants A and B

Пространственные параметры датчиков Sensor space parameters	Номер $i$ -го датчика $i$ sensor number									Примечание Note
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	
$x_i, \text{ м}$ $x_i, \text{ m}$	1,5	4,5	7,5	1,5	4,5	7,5	1,5	4,5	7,5	—
$y_i, \text{ м}$ $y_i, \text{ m}$	7,5			4,5			1,5			—
$R_i^A, \text{ м}$ $R_i^A, \text{ m}$	5,6	5,9	7,4	2,7	3,2	5,6	1,1	2,1	5,0	Вариант А Variant A
$R_i^B, \text{ м}$ $R_i^B, \text{ m}$	4,0	2,1	3,2	3,6	1,1	2,7	5,3	4,0	4,7	Вариант Б Variant B

той  $H = 5 \text{ м}$  с начальной температурой  $T_0 = 20 \text{ }^\circ\text{C}$ , в припотолочной части которого размещены девять термодатчиков для измерения температуры и скорости ее изменения. Схема размещения термодатчиков приведена на рис. 1, их координаты — в табл. 1.



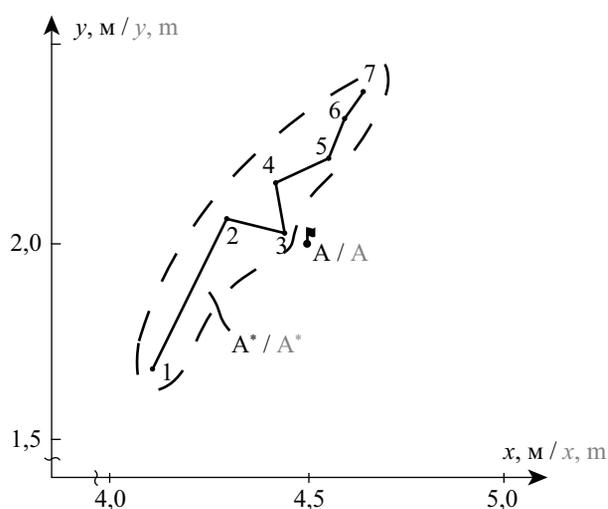
**Рис. 1.** Схема размещения девяти термодатчиков в припотолочной зоне помещения и тестовые очаги вариантов пожаров А и Б

**Fig. 1.** Layout of nine temperature sensors in the ceiling area of the premises and test centers of A and B fire variants

С применением модели Р. Альперта [40] и специально разработанной компьютерной программы по выражениям (2), (3) и (5) для двух вариантов пожара А и Б с координатами очагов  $(2,5 \text{ м}; 2,0 \text{ м})_A$  и  $(5,0 \text{ м}; 5,5 \text{ м})_B$  были смоделированы динамика прироста температуры  $\Delta T_i(t)$  и скорости ее

изменения. Результаты моделирования приведены в табл. 2.

Как следует из табл. 2, для варианта пожара А термодатчики по степени убывания нагрева можно расположить в последовательности: 7, 8, 4, 5, 9, 1, 6, 2, 3, а для варианта Б в последовательности: 5, 2, 6, 3, 4, 1, 8, 9, 7. С учетом этого и данных табл. 2 по выражению (10) для различных сочетаний датчиков были определены вероятные координаты очагов пожара  $(x_0, y_0)$ , которые приведены в табл. 3 и представлены на рис. 1 (заштрихованные области), а также на рис. 2 и 3 в увеличенном масштабе.



**Рис. 2.** Результаты определения координат очага пожара А (цифры в области  $A^*$  соответствуют номеру расчета в первом столбце табл. 3). Флажком обозначен очаг пожара

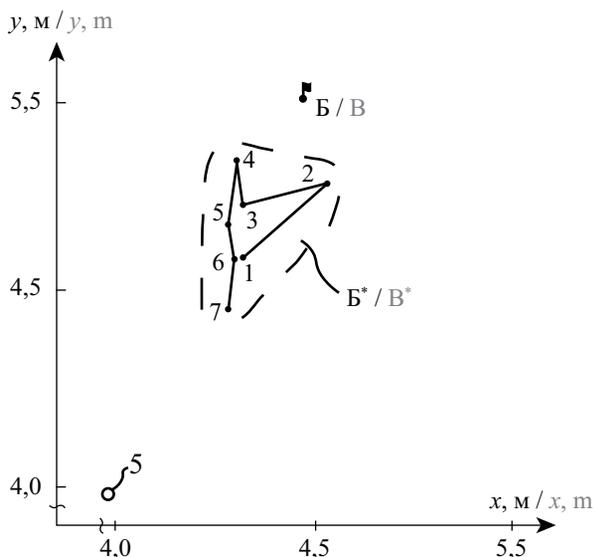
**Fig. 2.** The results of setting the coordinates of the seat of fire A (the digits in the area  $A^*$  correspond to the number of the calculation in the first column of the table 3). The flag indicates the seat of fire

**Таблица 2.** Значения прироста температуры и скорости ее изменения для вариантов пожара А и Б на 60-й секунде пожара  
**Table 2.** Temperature increase and rate of change values for fire variants A and B at 60th second of fire

Параметр Parameter	Номера датчиков Sensor numbers									Вариант Variant
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	
$\Delta T_i, ^\circ\text{C}$	39,2	38,6	35,9	51,2	47,8	39,2	76,1	57,3	40,6	А
$dT_i/dt, ^\circ\text{C}/\text{c}$	0,455	0,441	0,376	0,740	0,659	0,455	1,330	0,884	0,488	А
$\Delta T_i, ^\circ\text{C}$	43,9	57,3	47,8	45,5	76,1	51,2	39,8	43,9	41,5	Б
$dT_i/dt, ^\circ\text{C}/\text{c}$	0,565	0,884	0,659	0,605	1,330	0,740	0,470	0,565	0,509	Б

**Таблица 3.** Результаты определения вероятных координат очагов пожаров А и Б  
**Table 3.** Results of determination of probable coordinates of fire seats A and B

Вариант А / Variant A				Вариант Б / Variant B			
№ No.	Учитываемые датчики Recordable sensors	$x_o, \text{м}$ $x_o, \text{m}$	$y_o, \text{м}$ $y_o, \text{m}$	№ No.	Учитываемые датчики Consider the sensors	$x_o, \text{м}$ $x_o, \text{m}$	$y_o, \text{м}$ $y_o, \text{m}$
1	7, 8, 4, $N=3$	2,10	1,85	1	5, 2, 6, $N=3$	4,85	5,10
2	7, 8, 4, 5, $N=4$	2,29	2,06	2	5, 2, 6, 3, $N=4$	5,06	5,29
3	7, 8, 4, 5, 9, $N=5$	2,44	2,04	3	5, 2, 6, 3, 4, $N=5$	4,86	5,24
4	7, 8, 4, 5, 9, 1, $N=6$	2,42	2,17	4	5, 2, 6, 3, 4, 1, $N=6$	4,71	5,34
5	7, 8, 4, 5, 9, 1, 6, $N=7$	2,54	2,22	5	5, 2, 6, 3, 4, 1, 8, $N=7$	4,70	5,18
6	7, 8, 4, 5, 9, 1, 6, 2, $N=8$	2,58	2,33	6	5, 2, 6, 3, 4, 1, 8, 9, $N=8$	4,78	5,07
7	7, 8, 4, 5, 9, 1, 6, 2, 3, $N=9$	2,64	2,40	7	5, 2, 6, 3, 4, 1, 8, 9, 7, $N=9$	4,71	4,99



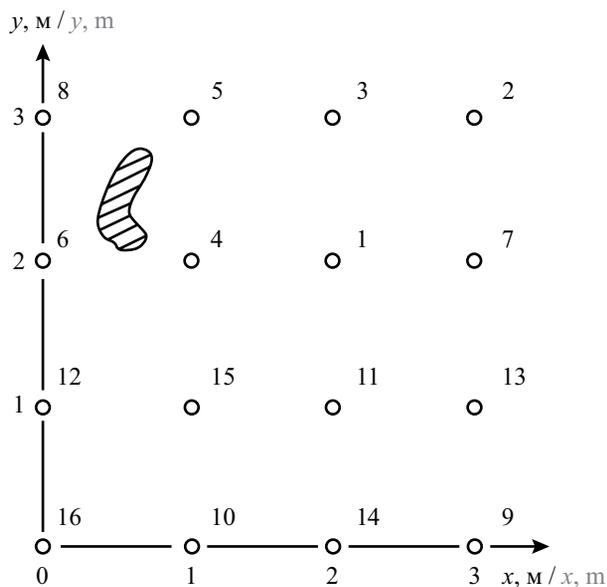
**Рис. 3.** Результаты определения координат очага пожара Б (цифрам в области Б\* соответствуют номера расчетов в пятом столбце табл. 3), цифрой «5» указан номер термодатчика, соответствующий рис.1, флажком обозначен очаг пожара  
**Fig. 3.** The results of setting the coordinates of the seat of fire B (the digits in the area B\* correspond to the number of calculations in the fifth column of Table 3), the digit “5” indicates the number of the temperature sensor corresponding to Fig. 1, the flag indicates the seat of fire

Как видно из рис. 1, рассчитанные по выражению (10) координаты очагов пожаров достаточно хорошо совпадают с тестовыми. При этом как по величинам повышения температуры  $\{\Delta T_i\}$ , так и скорости ее роста  $\{dT_i/dt\}$ , результаты оценки координат очагов пожаров одинаковы. В случае варианта пожара А должен быть активирован ороситель у датчика 7, а при варианте пожара Б — ороситель у датчика 5.

В то же время, использование данных всех термодатчиков вряд ли рационально, целесообразно учитывать только наиболее нагретые.

### Натурный эксперимент

Для решения задач, связанных с определением координат пожара по результатам показаний термодатчиков, полученных в ходе натуральных экспериментов, термодатчики в количестве 16 шт. располагались в припотолочной области с шагом 1 м (рис. 4) на высоте 4 и 8 м, пожарной нагрузкой являлись листы картона  $1,8 \times 1,8$  м (рис. 5) и картонные коробки. В ходе экспериментов всеми термодатчиками регистрировались значения температуры  $\{\Delta T_1, \dots, \Delta T_{16}\}$  с частотой 18 с (рис. 6), тушение не проводилось.



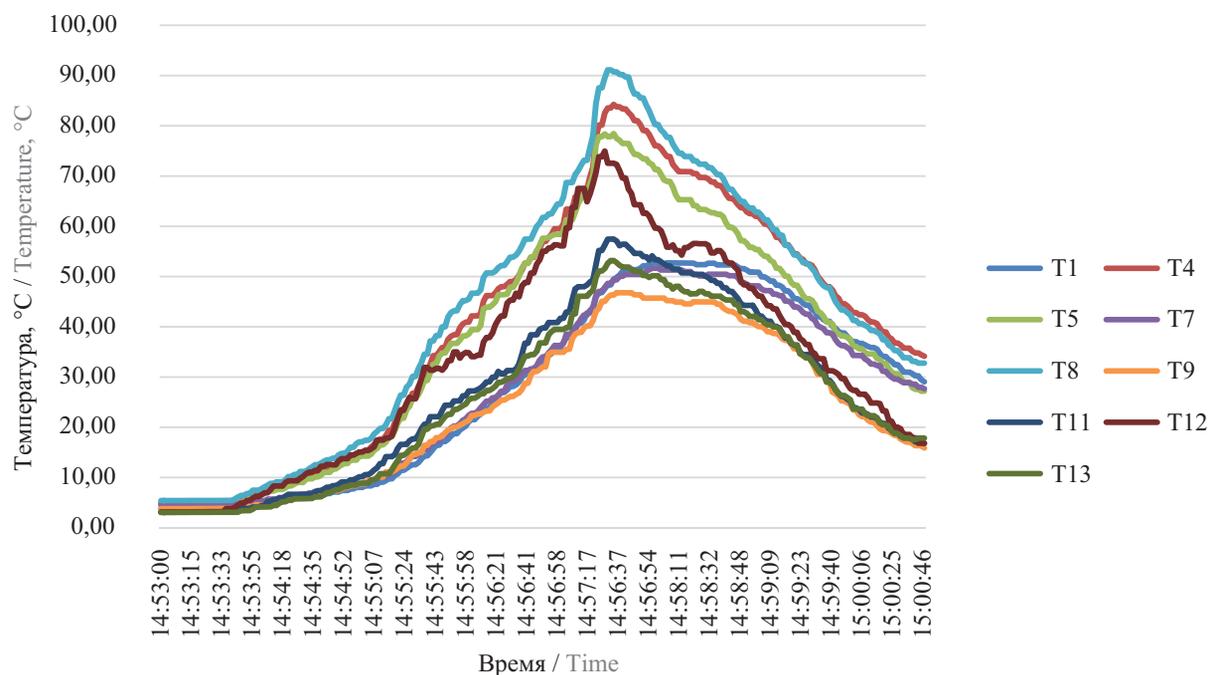
**Рис. 4.** Схема размещения 16-ти термодатчиков в припотолочной зоне испытательной лаборатории ВНИИПИИ. Заштрихованная область — рассчитанные по выражению (10) координаты очага пожара по результатам обработки экспериментальных данных

**Fig. 4.** Layout of 16 temperature sensors in the ceiling area of the VNIIPII (All-Russian Research, Design and Survey Institute) testing laboratory. Shaded area is calculated using the expression (10) coordinates of the fire seat according to the results of experimental data processing



**Рис. 5.** Эксперимент по воспламенению пожарной нагрузки (картонных листов  $1,8 \times 1,8$  м) в испытательной лаборатории ВНИИПИИ

**Fig. 5.** Fire load ignition experiment (cardboard sheets  $1.8 \times 1.8$  m) in the testing laboratory of VNIIPII



**Рис. 6.** Пример результатов регистрации температуры в ходе одного из экспериментов (воспламенение картонных листов размером  $1,8 \times 1,8$  м, высота установки термодатчиков —  $H = 4$  м)

**Fig. 6.** Example of results of temperature registration during one of the experiments (ignition of cardboard sheets with the size of  $1.8 \times 1.8$  m, installation height of temperature sensors  $H = 4$  m)

**Таблица 4.** Результаты обработки результатов испытаний в ВНИИПИИ

**Table 4.** Results of processing the test results at VNIIPPII

Номер термодатчика Sensor number	8	4	5	12	6	10	16	11	3	13
$\Delta T_i, ^\circ\text{C}$	39,02	34,82	32,82	30,62	25,41	24,37	22,72	22,15	21,52	20,89
$dT_i/dt, ^\circ\text{C}/\text{c}$	0,947	0,847	0,796	0,643	0,557	0,567	0,531	0,523	0,511	0,514

**Таблица 5.** Спрогнозированные координаты пожара

**Table 5.** The predicted coordinates of the fire

№ No.	Учитываемые датчики Recordable sensors	Определение координат очага пожара Setting the coordinates of the fire seat			
		по $\{\Delta T_i\}$ / by $\{\Delta T_i\}$		по $\{dT_i/dt\}$ / by $\{dT_i/dt\}$	
		$x_o, \text{ м} / x_o, \text{ m}$	$y_o, \text{ м} / y_o, \text{ m}$	$x_o, \text{ м} / x_o, \text{ m}$	$y_o, \text{ м} / y_o, \text{ m}$
1	8, 4, 5, $N=3$	0,57	2,69	0,57	2,69
2	8, 4, 5, 12, $N=4$	0,47	2,40	0,50	2,49
3	8, 4, 5, 12, 6, $N=5$	0,43	2,36	0,46	2,45
4	8, 4, 5, 12, 6, 10, $N=6$	0,47	2,19	0,50	2,28
5	8, 4, 5, 12, 6, 10, 16, $N=7$	0,44	2,07	0,47	2,16
6	8, 4, 5, 12, 6, 10, 16, 11, $N=8$	0,52	2,01	0,55	2,10
7	8, 4, 5, 12, 6, 10, 16, 11, 3, $N=9$	0,58	2,06	0,61	2,14
8	8, 4, 5, 12, 6, 10, 16, 11, 3, 13, $N=10$	0,68	2,02	0,72	2,09

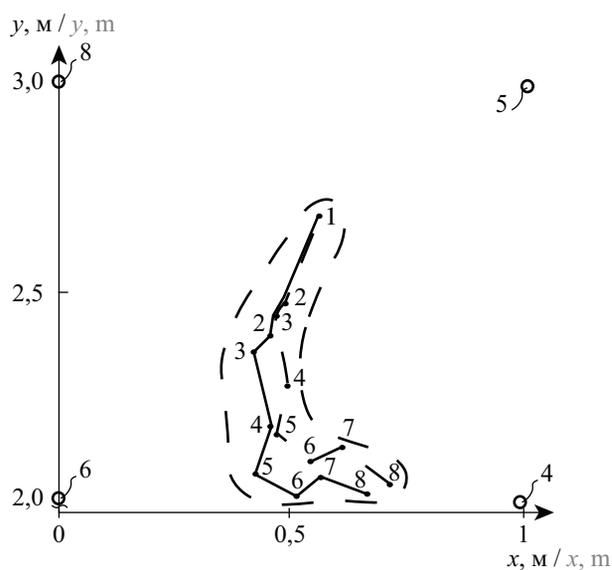
Результаты экспериментов обрабатывались с помощью компьютерной программы, реализующей выражение (10). В частности, для примера, приведенного на рис. 6, установлено, что наиболее нагретыми являются следующие термодатчики: 8, 4, 5, 12, 6, 10, 16, 11, 3, 13. В табл. 4 приведены данные о величинах  $\{\Delta T_i\}$  и  $\{dT_i/dt\}$  для 30-й секунды пожара, табл. 5 — спрогнозированные по выражению (10) координаты очага пожара.

Полученные таким путем координаты очага ( $x_o, y_o$ ) приведены на рис. 4 в виде заштрихованной области, на рис. 7 — в укрупненном масштабе. Из полученных оценок координат очага следует, что в первую очередь должны быть активированы три спринклера, расположенные у датчиков 4–6.

Некоторую размытость области оценок координат ( $x_o, y_o$ ) можно объяснить фактом выгорания центра пожарной нагрузки и последующего горения по ее периметру.

**Выводы**

Использование полученного в ходе исследования выражения (10) дает возможность оперативно, с приемлемой достоверностью определять координаты очага пожара, что позволяет принудительно активировать один, два или три оросителя, которые способны подавить пожар на самой ранней



**Рис. 7.** Результаты определения координат очага пожара (цифры соответствуют номерам расчетов в первом столбце табл. 4, сплошные линии —  $\Delta T_i$ , пунктирные линии —  $dT_i/dt$ ), цифрами «4», «5» и «6» указаны номера термодатчиков в соответствии с рис. 4

**Fig. 7.** Results of setting the coordinates of the fire seat (the digits correspond to the numbers of calculations in the first column of table 4, full lines –  $\Delta T_i$ , dotted lines –  $dT_i/dt$ ), numbers “4”, “5” and “6” indicate the numbers of temperature sensors according to Fig. 4

стадии с минимальным количеством расходуемого огнетушащего вещества. Выражение (10) хорошо алгоритмизируется и может применяться в системах управления спринклерных автоматических установок пожаротушения.

В дальнейшем могут быть проведены исследования по совершенствованию выражения (10) в части уточнения степени прироста температуры, введения весовых коэффициентов термодатчиков и др.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Markus E., Snegirev A., Kuznetsov E., Tanklevskiy L.* Application of a simplified pyrolysis model to predict fire development in rack storage facilities // *Journal of Physics: Conference Series*. 2018. Vol. 1107. Issue 4. P. 042012. DOI: 10.1088/1742-6596/1107/4/042012
2. *Markus E., Snegirev A., Kuznetsov E., Tanklevskiy L.* Fire growth in a high-rack storage // *Proceedings of the Ninth International Seminar on Fire and Explosion Hazards*. 2019. Vol. 2. Pp. 796–807. DOI: 10.18720/spbpu/2/k19-70
3. *Дорожкин А.С., Таранцев А.А., Минкин Д.Ю.* Проблема пожарной безопасности подземных автостоянок // *Проблемы управления рисками в техносфере*. 2015. № 1 (33). С. 13–18.
4. *Таранцев А.А., Шидловский Г.Л., Потапов Д.А.* Особенности распространения опасных факторов пожара в подземных стоянках автомобилей // *Проблемы управления рисками в техносфере*. 2020. № 1 (53). С. 43–52.
5. *Kopylov S., Tanklevskiy L., Vasilev M., Zima V., Snegirev A.* Advantages of Electronically Controlled Sprinklers (ECS) for fire protection of tunnels // *Proceedings from the Fifth International Symposium on Tunnel Safety and Security, New York, USA, March 14-16, 2012*. 2012. Vol. 1. Pp. 87–92.
6. *Родэ А.А., Иванов Е.Н., Климов Г.В.* Автоматические установки для тушения пожаров. М. : Стройиздат, 1965. 187 с.
7. *Ходаков В.Ф.* Автоматические установки водяного пожаротушения. Киев : Будівельник, 1970. 92 с.
8. *Бубыр Н.Ф., Иванов А.Ф., Бабуров В.П., Мангасаров В.И.* Установки автоматической противопожарной защиты : учеб. пособие для пожарно-техн. училищ. М. : Стройиздат, 1979. 176 с.
9. *Болотин Е.Т., Мажара И.И., Пестмаль Н.Ф.* Проектирование установок автоматического пожаротушения. Киев : Будівельник, 1980. 116 с.
10. *Бубыр Н.Ф., Воробьев Р.П., Быстров Ю.В., Зуйков Г.М.* Эксплуатация установок пожарной автоматики. М. : Стройиздат, 1986. 367 с.
11. *Агафонов В.В., Копылов Н.П.* Установки аэрозольного пожаротушения: элементы и характеристики, проектирование, монтаж и эксплуатация. М. : ВНИИПО, 1999. 232 с.
12. *Мешман Л.М., Цариченко С.Г., Былинкин В.А., Аleshин В.В., Губин Р.Ю.* Проектирование водяных и пенных автоматических установок пожаротушения. М. : ВНИИПО МЧС РФ, 2002. 413 с.
13. *Собурь С.В.* Установки пожаротушения автоматические : справочник. М. : Спецтехника, 2003. 400 с.
14. *Сафронов В.В., Аксенова Е.В.* Выбор и расчет параметров установок пожаротушения и сигнализации : учеб. пособие. Орел : ОрелГТУ, 2004. 57 с.
15. *Храпский С.Ф., Стариков В.И., Рысев Д.В.* Производственная и пожарная автоматика : учеб. пособие. Омск : Издательство ОмГТУ, 2013. 152 с.
16. *Собурь С.В.* Установки пожарной сигнализации : учебно-справочное пособие. М. : Пожкнига, 2015. 256 с.
17. *Воронков О.Ю.* Расчет, монтаж и эксплуатация автоматических установок пожаротушения : учеб. пособие. Омск : Издательство ОмГТУ, 2016.
18. *Илюшов Н.Я.* Автоматические установки пожаротушения : учеб. пособие. Новосибирск : Изд-во НГТУ, 2016. 134 с.
19. *Mitchell N.D.* New Light on Self-Ignition // *Quarterly of the National Fire Protection Association*. 1951. Vol. 45. Issue 2. Pp. 165–172.
20. *Rasbash D.J.* The extinction of fires by water sprays // *Fire Research Abstracts and Reviews*. 1962. Vol. 4. Pp. 28–52.
21. *Williams F.A.* A unified view of fire suppression // *Journal of Fire and Flammability*. 1974. Vol. 5. Pp. 54–63.
22. *Bryan J.L.* Fire suppression and detection systems. Beverley Hills, California : Glencoe Press, 1974. 409 p.
23. *Yao C.* Development of large-drop sprinklers // *FMRC Technical Report Serial No. 22476*. Norwood, MA : Factory Mutual Research Corporation, 1976.
24. *Bullen M.L.* The effect of a sprinkler on the stability of a smoke layer beneath a ceiling // *Fire Technology*. 1977. No. 13. Pp. 21–34. DOI: 10.1007/BF02338883
25. *Yao C.* Application of sprinkler technology // *Workshop on Engineering Applications of Fire Technology held at the National Bureau of Standards*. 1980.
26. *Fire protection handbook: Fifteenth Edition*. National Fire Protection Association, 1981. 50 p.

27. Tanklevskiy L., Tsoy A., Snegirev A. Electrically controlled dynamic sprinkler activation: Computational assessment of potential efficiency // *Fire Safety Journal*. 2017. Vol. 91. Pp. 614–623. DOI: 10.1016/j.firesaf.2017.04.019
28. Tanklevskiy L., Vasiliev M., Meshman L., Snegirev A., Tsoi A. A novel methodology of electrically controlled sprinkler activation // *Proceedings of the 13th International conference Interflam 2013 (Royal Holloway College University of London, UK, 24–26 June)*. 2013. Pp. 503–508.
29. Таранцев А.А., Танклевский Л.Т., Снегирев А.Ю., Цой А.С., Копылов С.Н., Мешман Л.М. Оценка эффективности спринклерной установки пожаротушения // *Пожарная безопасность*. 2015. № 1. С. 72–79.
30. Королева Л.А., Таранцев А.А., Груданова О.В. Об экономической оценке двух путей модернизации установок пожаротушения // *Проблемы управления рисками в техносфере*. 2007. № 1. С. 38–42.
31. Мешман Л.М., Снегирев А.Ю., Танклевский Л.Т., Таранцев А.А. О возможности использования пластиковых труб в спринклерных установках автоматического пожаротушения // *Пожаровзрывобезопасность/Fire and Explosion Safety*. 2014. Т. 23. № 10. С. 73–78.
32. Артамонов В.С., Груданова О.В., Таранцев А.А. Уточненный порядок расчета одноуровневых разветвленных гидравлических сетей // *Пожаровзрывобезопасность/Fire and Explosion Safety*. 2008. Т. 17. № 3. С. 77–83.
33. Tsoi A., Snegirev A., Tanklevskiy L., Sheinman I. Flame suppression by water sprays: exploring capabilities and failures of FDS // *Proceedings of the Seventh International Seminar Fire and Explosion Hazards*. 2013. Pp. 482–491. DOI: 10.3850/978-981-07-5936-0\_07-05
34. Бабиков И.А., Танклевский А.Л., Таранцев А.А. О способе определения группы принудительно активируемых оросителей при возникновении пожара в помещении // *Проблемы управления рисками в техносфере*. 2019. № 3 (51). С. 34–41.
35. Xin Y., Burchesky K., De Vries J., Magistrale H., Zhou X., D'Aniello S. SMART sprinkler protection for highly challenging fires — part 1: system design and function evaluation // *Fire Technology*. 2017. Vol. 53. Pp. 1847–1884. DOI: 10.1007/s10694-017-0662-2
36. Drysdale D. An introduction to fire dynamics. Chichester : John Wiley & Sons, 1985. 440 p.
37. Snegirev A.Yu., Tanklevskii L.T. The macrokinetics of indoor fire // *High Temperature*. 1998. Vol. 36. Issue 5. Pp. 737–743.
38. Snegirev A.Yu., Tanklevskii L.T. Numerical simulation of turbulent convection of gas indoors in the presence of a source of ignition // *High Temperature*. 1998. Vol. 36. Issue 6. Pp. 949–959.
39. Markus E., Snegirev A., Kuznetsov E., Tanklevskiy L. Application of the thermal pyrolysis model to predict flame spread over continuous and discrete fire load // *Fire Safety Journal*. 2019. Vol. 108. P. 102825. DOI: 10.1016/j.firesaf.2019.102825
40. Alpert R.L. Ceiling Jet Flows // *SFPE Handbook of Fire Protection Engineering*. Quincy : National Fire Protection Association, 2002. Pp. 2-18–2-31.
41. Пособие по применению «Методики определения расчетных величин пожарного риска в зданиях, сооружениях и строениях различных классов функциональной пожарной опасности». М. : ВНИИПО МЧС России, 2012.
42. Линник Ю.В. Метод наименьших квадратов и основы математико-статистической теории обработки наблюдений. М. : Физматгис, 1962. 349 с.

## REFERENCES

1. Markus E., Snegirev A., Kuznetsov E., Tanklevskiy L. Application of a simplified pyrolysis model to predict fire development in rack storage facilities. *Journal of Physics: Conference Series*. 2018; 1107(4):042012. DOI: 10.1088/1742-6596/1107/4/042012
2. Markus E., Snegirev A., Kuznetsov E., Tanklevskiy L. Fire growth in a high-rack storage. *Proceedings of the Ninth International Seminar on Fire and Explosion Hazards*. 2019; 2:796–807. DOI: 10.18720/spbpu/2/k19-70
3. Dorozhkin A.S., Tarantsev A.A., Minkin D.Yu. Problems of fire safety underground parking. *Problems of Technosphere Risk Management*. 2015; 1(33):13-18. (rus.).
4. Tarantsev A.A., Shidlovsky G.L., Potashev D.A. Features of the spread of fire hazards in underground parking lots. *Problems of Technosphere Risk Management*. 2020; 1(53):43-52. (rus.).
5. Kopylov S., Tanklevskiy L., Vasilev M., Zima V., Snegirev A. Advantages of Electronically Controlled Sprinklers (ECS) for fire protection of tunnels. *Proceedings from the Fifth International Symposium on Tunnel Safety and Security, New York, USA, March 14-16, 2012*. 2012; 1:87-92.
6. Rode A.A., Ivanov E.N., Klimov G.V. *Automatic systems for fire extinguishing*. Moscow, Stroyizdat Publ., 1965; 187. (rus.).
7. Khodakov V.F. *Automatic systems for water fire extinguishing*. Kiev, Budivel'nik, 1970; 92. (rus.).

8. Bubyр N.F., Ivanov A.F., Baburov V.P., Mangasarov V.I. *Installations of automatic fire protection: study guide for fire-technical schools*. Moscow, Stroyizdat, 1979; 176. (rus.).
9. Bolotin E.T., Mazhara I.I., Pestmal N.F. *Design of automatic fire extinguishing systems*. Kiev, Budivelnik, 1980; 116. (rus.).
10. Bubyр N.F., Vorobyev R.P., Bystrov Yu.V., Zuykov G.M. *Operation of fire automatics*. Moscow, Stroyizdat, 1986; 367. (rus.).
11. Agafonov V.V., Kopylov N.P. *Aerosol fire extinguishing installations: elements and characteristics, design, installation and operation*. Moscow, VNIPO Publ., 1999; 232. (rus.).
12. Meshman L.M., Tsarichenko S.G., Bylinkin V.A., Aleshin V.V., Gubin R.Yu. *Design of water and foam automatic fire extinguishing systems*. Moscow, VNIPO of EMERCOM of Russia, 2002; 413. (rus.).
13. Sobur S.V. *Automatic fire extinguishing installations: handbook*. Moscow, Spetstekhnika Publ., 2003; 400. (rus.).
14. Safronov V.V., Aksenova E.V. *The selection and calculation of parameters of fire extinguishing and alarm systems: study guide*. Orel, Orel State Technical University Publ., 2004; 57. (rus.).
15. Khrapskiy S.F., Starikov V.I., Rysev D.V. *Industrial and fire automatics: study guide*. Omsk, OmSTU Publ., 2013; 152. (rus.).
16. Sobur S.V. *Fire alarm systems: study guide*. Moscow, Pozhkniga Publ., 2015; 256. (rus.).
17. Voronkov O.Yu. *Calculation, installation and operation of automatic fire extinguishing systems*. Omsk, OmSTU Publ., 2016. (rus.).
18. Ilyushov N.Ya. *Automatic fire extinguishing systems: study guide*. Novosibirsk, NSTU Publ., 2016; 134. (rus.).
19. Mitchell N.D. New Light on Self-Ignition. *Quarterly of the National Fire Protection Association*. 1951; 45(2):165-172.
20. Rasbash D.J. The extinction of fires by water sprays. *Fire Research Abstracts and Reviews*. 1962; 4:28-52.
21. Williams F.A. A unified view of fire suppression. *Journal of Fire and Flammability*. 1974; 5:54-63.
22. Bryan J.L. *Fire Suppression and Detection Systems*. Beverley Hills, California, Glencoe Press, 1974; 409.
23. Yao C. Development of large-drop sprinklers. *FMRC Technical Report Serial No. 22476*. Norwood, MA, Factory Mutual Research Corporation, 1976.
24. Bullen M.L. The effect of a sprinkler on the stability of a smoke layer beneath a ceiling. *Fire Technology*. 1977; 13:21-34. DOI: 10.1007/BF02338883
25. Yao C. Application of sprinkler technology. *Workshop on Engineering Applications of Fire Technology held at the National Bureau of Standards*. 1980.
26. *Fire Protection Handbook: Fifteenth Edition*. National Fire Protection Association, 1981; 50.
27. Tanklevskiy L., Tsoy A., Snegirev A. Electrically controlled dynamic sprinkler activation: Computational assessment of potential efficiency. *Fire Safety Journal*. 2017; 91:614-623. DOI: 10.1016/j.firesaf.2017.04.019
28. Tanklevskiy L., Vasiliev M., Meshman L., Snegirev A., Tsoi A. A novel methodology of electrically controlled sprinkler activation. *Proceedings of the 13th International conference Interflam 2013 (Royal Holloway College University of London, UK, 24-26 June)*. 2013; 503-508.
29. Tarantsev A.A., Tanklevskiy L.T., Snegirev A.Yu., Tsoy A.S., Kopylov S.N., Meshman L.M. Assessment of the sprinkler installation efficiency. *Fire Safety*. 2015; 1:72-79. (rus.).
30. Koroleva L.A., Tarantsev A.A., Grudanova O.V. On the economic assessment of two ways to modernize fire extinguishing installations. *Problems of Technosphere Risk Management*. 2007; 1:38-42. (rus.).
31. Meshman L.M., Snegirev A.Yu., Tanklevskiy L.T., Tarantsev A.A. On the possibility of the use of plastic pipes sprinkler automatic fire extinguishing installations. *Pozharovzryvobezopasnost/Fire and Explosion Safety*. 2014; 23(10):73-78. (rus.).
32. Artamonov V.S., Grudanova O.V., Tarantsev A.A. Refined calculation procedure for single level branched hydraulic networks. *Pozharovzryvobezopasnost/Fire and Explosion Safety*. 2008; 17(3):77-83. (rus.).
33. Tsoi A., Snegirev A., Tanklevskiy L., Sheinman I. Flame suppression by water sprays: exploring capabilities and failures of FDS. *Proceedings of the Seventh International Seminar Fire and Explosion Hazards*. 2013; 482-491. DOI: 10.3850/978-981-07-5936-0\_07-05
34. Babikov I.A., Tanklevskiy A.L., Tarantsev A.A. Determination method of sprinklers with electrical activation in case of internal fire. *Problems of Technosphere Risk Management*. 2019; 3(51):34-41. (rus.).
35. Xin Y., Burchesky K., De Vries J., Magistrale H., Zhou X., D'Aniello S. SMART sprinkler protection for highly challenging fires — part 1: system design and function evaluation. *Fire Technology*. 2017; 53:1847-1884. DOI: 10.1007/s10694-017-0662-2
36. Drysdale D. *An Introduction to Fire Dynamics*. Chichester, John Wiley & Sons, 1985; 440.
37. Snegirev A.Yu., Tanklevskii L.T. The macrokinetics of indoor fire. *High Temperature*. 1998; 36(5):737-743.
38. Snegirev A.Yu., Tanklevskii L.T. Numerical simulation of turbulent convection of gas indoors in the presence of a source of ignition. *High Temperature*. 1998; 36(6):949-959.

39. Markus E., Snegirev A., Kuznetsov E., Tanklevskiy L. Application of the thermal pyrolysis model to predict flame spread over continuous and discrete fire load. *Fire Safety Journal*. 2019; 108:102825. DOI: 10.1016/j.fire-saf.2019.102825
40. Alpert R.L. Ceiling Jet Flows. *SFPE Handbook of Fire Protection Engineering*. Quincy, National Fire Protection Association, 2002; 2-18-2-31.
41. *The application manual of "Methods for determining the calculated values of fire risk in buildings, constructions and structures of various classes of functional fire hazard"*. Moscow, VNIPO of EMERCOM of Russia, 2012. (rus.).
42. Linnik Yu.V. *The least squares method and the basics of the mathematical-statistical theory of observation processing*. Moscow, Fizmatgis Publ., 1962; 349. (rus.).

*Поступила 15.04.2020, после доработки 07.05.2020;  
принята к публикации 29.05.2020*

*Received April 15, 2020; Received in revised form May 7, 2020;  
Accepted May 29, 2020*

### Информация об авторах

**ТАНКЛЕВСКИЙ Леонид Тимофеевич**, д-р техн. наук, профессор, заведующий кафедрой Высшей школы техносферной безопасности, Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого, г. Санкт-Петербург, Российская Федерация; Author ID: 181476, ResearcherID: S-1901-2017; Scopus Author ID: 57192367552; ORCID: 0000-0002-2769-0086; e-mail: tanklevskiy@gefest-spb.ru

**БАБИКОВ Игорь Александрович**, аспирант Высшей школы техносферной безопасности, Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого, г. Санкт-Петербург, Российская Федерация; Author ID: 949758, ResearcherID: S-5502-2017; Scopus Author ID: 57205082476; ORCID: 0000-0003-4100-1686; e-mail: babikovia@gmail.com

**ТАРАНЦЕВ Александр Алексеевич**, д-р техн. наук, профессор, заведующий лабораторией Института проблем транспорта им. Н.С. Соломенко Российской академии наук, Санкт-Петербург, Российская Федерация; профессор, Санкт-Петербургский университет Государственной противопожарной службы МЧС России, г. Санкт-Петербург, Российская Федерация; Author ID: 664653, ResearcherID: K-2087-2018; Scopus Author ID: 57195636448; ORCID: 0000-0003-1561-2483; e-mail: info@iptran.ru

**ЗЫБИНА Ольга Александровна**, д-р техн. наук, доцент Высшей школы техносферной безопасности, Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого, г. Санкт-Петербург, Российская Федерация; Author ID: 505657, ORCID: 0000-0001-9401-7206; ResearcherID: Q-4451-2017; Scopus Author ID: 6504571187, e-mail: zybina\_oa@spbstu.ru

### Information about the authors

**Leonid T. TANKLEVSKIY**, Dr. Sci. (Eng.), Professor, Head of Department of Higher School of Technosphere Safety, Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University, Saint Petersburg, Russian Federation; Author ID: 181476, ResearcherID: S-1901-2017; Scopus Author ID: 57192367552; ORCID: 0000-0002-2769-0086; e-mail: tanklevskiy@gefest-spb.ru

**Igor A. BABIKOV**, Graduate Student of Department of Higher School of Technosphere Safety, Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University, Saint Petersburg, Russian Federation; Author ID: 949758, ResearcherID: S-5502-2017; Scopus Author ID: 57205082476; ORCID: 0000-0003-4100-1686; e-mail: babikovia@gmail.com

**Alexander A. TARANTSEV**, Dr. Sci. (Eng.), Professor, Head of Laboratory of Solomenko Institute of Transport Problems of the Russian Academy of Sciences; Professor; Saint Petersburg University of State Fire Service of EMERCOM of Russia, Saint Petersburg, Russian Federation; Author ID: 664653, ResearcherID: K-2087-2018; Scopus Author ID: 57195636448; ORCID: 0000-0003-1561-2483; e-mail: info@iptran.ru

**Olga A. ZYBINA**, Dr. Sci. (Eng.), Associate Professor of the Department of the Higher school of technosphere safety, Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University, Saint Petersburg, Russian Federation; Author ID: 505657, ORCID: 0000-0001-9401-7206; ResearcherID: Q-4451-2017; Scopus Author ID: 6504571187, e-mail: zybina\_oa@spbstu.ru

## Обзор программного обеспечения расчета огнестойкости строительных конструкций для различных моделей пожаров

© Т.Ю. Еремина✉, Д.А. Корольченко

Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет  
(Россия, 129337, г. Москва, Ярославское шоссе, 26)

### АННОТАЦИЯ

**Введение.** При анализе пожарной безопасности объекта проверяется соответствие фактических пределов огнестойкости конструкций требованиям нормативных документов. Из-за сложности уравнений, описывающих реальные системы, и большого числа итераций, необходимых для получения точных результатов, расчеты проводятся с использованием программного обеспечения. Одной из основных целей работы является анализ программного обеспечения расчета огнестойкости строительных конструкций для различных моделей пожаров. В работе представлены анализ критериев оценки программ и их классификации, оценка рекомендаций по выбору программного обеспечения для решения задач пожарной безопасности, которое соответствует конкретным потребностям пользователей.

**Основная (аналитическая) часть.** В работе проанализированы различные модели пожаров, учитывающие стадии развития пожара, тепловые и механические воздействия на конструкции в условиях пожара, и предпосылки их использования в программах для расчета огнестойкости строительных конструкций. Рассмотрены модели расчета огнестойкости конструкций, зонные и полевые модели, а также используемые при решении сопутствующих задач модели расчета времени эвакуации и времени срабатывания детекторов. Проанализирована классификация расчетных комплексов по типу решаемых задач: для оценки поведения конструкции при высокотемпературном и механическом воздействии в условиях реального пожара и для определения требований, которым должны соответствовать безопасные конструкции. Рассмотрены определенные предположения и допущения, необходимые специалистам для выполнения вычислений в программных комплексах.

**Выводы.** Представлены рекомендации по выбору программного обеспечения для решения задач пожарной безопасности, которое соответствует конкретным потребностям пользователей.

**Ключевые слова:** устойчивость строительной конструкции; огнесохранность объекта; высокотемпературные воздействия; пожарная безопасность; нормирование в строительстве; зарубежный опыт

**Для цитирования:** Еремина Т.Ю., Корольченко Д.А. Обзор программного обеспечения расчета огнестойкости строительных конструкций для различных моделей пожаров // Пожаровзрывобезопасность/Fire and Explosion Safety. 2020. Т. 29. № 3. С. 44–53. DOI: 10.22227/PVB.2020.29.03.44-53

✉ Еремина Татьяна Юрьевна, e-mail: main@stopfire.ru

## Overview of software designated for the analysis of fire resistance of building structures exposed to various fire models

© Tatyana Yu. Eremina, Dmitry A. Korolchenko

Moscow State University of Civil Engineering (National Research University)  
(Yaroslavskoye Shosse, 26, Moscow, 129337, Russian Federation)

### ABSTRACT

**Introduction.** When analyzing the fire safety of a facility, the conformity of actual limits of fire resistance of structures to the requirements of statutory documents is checked. Due to the complexity of the equations describing real systems and an extensive number of iterations required to obtain accurate results, software is used to perform calculations. One of the main goals of the paper is to analyze the software designated for the analysis of the fire resistance of building structures in case of different fire models. The paper presents an analysis of the criteria for the evaluation of software programs and their classification, evaluation of recommendations for choosing fire safety software in compliance with the specific requirements of users.

**Main (Analytical) Part.** The paper analyzes various models of fires, taking into account the stages of fire spread, thermal and mechanical effects on structures exposed to fire, and prerequisites for their use by the software designated for the analysis of the fire resistance of building structures. Fire resistance models of structures, zone and field models, as well as models used to calculate evacuation time and detector response time when solving related problems are considered. The classification of software programmes is analyzed subject to the type of problems to be solved: the behavior of a structure

exposed to high temperatures and mechanical impacts in case of real fire, and requirements applicable to safe structures. Certain estimates and assumptions, necessary for specialists to use software in their calculations, are considered.

**Conclusions.** Recommendations on the choice of fire safety assurance software, meeting the specific needs of users, are provided.

**Keywords:** stability of a building structure; fire resistance of a facility; high temperature exposure; fire safety; regulation in the construction industry; international experience

**For citation:** Eremina T.Yu., Korolchenko D.A. Overview of software designated for the analysis of fire resistance of building structures exposed to various fire models. *Pozharovzryvobezopasnost/Fire and Explosion Safety*. 2020; 29(3):44-53. DOI: 10.22227/PVB.2020.29.03.44-53

✉ Tatyana Yuryevna Eremina, e-mail: main@stopfire.ru

## Введение

Компьютерное моделирование теплопереноса и задымления при пожаре широко используется при решении различных задач пожарной безопасности. Компьютерные ресурсы позволяют задействовать быстрые и точные методы вычислений с использованием обширной базы данных — результатов экспериментов и исследований. Такое моделирование должно учитывать также изменения нормативных документов. Программные комплексы постоянно развиваются и обновляются, что с использованием более обширной базы данных о пожарах позволяет получить более точный прогноз изменения нужных параметров.

Одним из важных аспектов при анализе пожарной безопасности объектов является использование надежных методик расчета огнестойкости конструкций. Известно, что конструкция с фактическим пределом огнестойкости сохраняет свою несущую функцию в течение периода времени, необходимого для обеспечения безопасности:

$$R_f > R_{req},$$

где  $R_f$  — фактическое значение предела огнестойкости конструкции;

$R_{req}$  — требуемое значение предела огнестойкости конструкции.

В международной практике на протяжении 20 лет разрабатывались различные варианты программного обеспечения расчета предела огнестойкости строительных конструкций для различных моделей пожаров [1–8]. Методы, на которых основаны эти программные комплексы, отражены в Еврокодах<sup>1</sup> и учитывают различные стадии развития пожара:

<sup>1</sup> Еврокод 3. Проектирование стальных конструкций. Часть 1–2. Общие правила определения огнестойкости (Eurocode 3 (ENV 1993-1-2): Design of steel structures. Part 1–2: General rules. Structural fire design).

Еврокод 4. Проектирование несущих конструкций из стали и бетона. Часть 1-1. Общие правила и правила для зданий, Часть 1-2. Общие правила. Расчет параметров с учетом огнестойкости. (Eurocode 4: Design of composite steel and concrete structures. Part 1-1: General rules and rules for buildings (EN 1994-1-1), Part 1-2: General rules — Structural fire design (EN 1994-1-2)).

возгорание;

- высокотемпературное воздействие (в зависимости от пожарной нагрузки объекта);
- поведение конструкций под нагрузкой при высокотемпературном воздействии;
- поведение под воздействием критического теплового потока либо высокотемпературного воздействия, способствующих созданию избыточных напряжений, приводящих в том числе к взрывообразному разрушению;
- механическая деформация (напряжение) конструкций;
- возможное обрушение.

При проверке безопасности необходимо четко определить требования, которым должна соответствовать конструкция. Обычно эти требования определяются в зависимости от времени. В каждой стране существуют нормы и правила, содержащие эти требования (предписывающие требования), разработаны различные методологии их определения [9–11].

Для расчета таких требуемых параметров, как устойчивость конструкции в условиях пожара и устойчивость, обеспечивающая безопасность, разработано множество программных комплексов<sup>2</sup> [12–16]. Важным аспектом каждого комплекса является используемая при расчете модель развития пожара.

Модель пожара описывает все стадии развития пожара — от возгорания до эвакуации и разрушения конструкции (а не только процессы развития пожара и распространения дыма). Все модели могут быть разбиты на экспериментальные и математические [17, 18]. Математические модели представляют собой систему уравнений, описывающих события, связанные с пожаром. Эти модели рассматриваются в данной работе.

Цель работы — анализ программного обеспечения расчета предела огнестойкости строительных конструкций для различных моделей пожаров. Для этого необходимо провести анализ критериев оценки программ и их классификации, анализ рекомендаций

<sup>2</sup> ANSYS Fluent Tutorial Guide. Canonsburg : ANSYS, Inc., 2011. URL: [http://www.ansys.fem.ir/ansys\\_fluent\\_tutorial.pdf](http://www.ansys.fem.ir/ansys_fluent_tutorial.pdf)

**Таблица 1.** Тепловые модели пожара  
**Table 1.** Thermal models of fire

Требования стандартов (Еврокодов) Standard requirements (Eurocodes)	Виды моделей Model types
Предписывающие требования в виде номинальных кривых «температура–время» Prescriptive requirements in the form of nominal temperature-time curves	Стандартные кривые «температура–время» Графики наружных пожаров Углеводородные графики Standard temperature-time curves External fire graphs Hydrocarbon graphs
Требования с учетом фактических характеристик реальных пожаров Requirements based on actual characteristics of real fires	Упрощенные модели пожара: – пожаров в помещениях – локализованных пожаров Simplified fire models: – indoor fires – contained fires  Усовершенствованные модели пожара: – зонная модель – полевая модель Advanced fire models: – zone model – field model

по выбору программного обеспечения для решения задач пожарной безопасности, которое соответствует конкретным потребностям пользователей.

#### Аналитическая часть.

#### Математические модели для решения задач пожарной безопасности

Математические модели подразделяют на детерминированные и статистические. Первые регулируются физическими и химическими законами и законами термодинамики; в то время как статистические представляют собой прогнозы событий. Из-за сложности этих уравнений и большого числа итераций, необходимых для получения точных результатов, необходимо использовать программное обеспечение.

Для оценки программного обеспечения его классификация принимается в зависимости от класса задач, которые оно решает (область применения программного обеспечения).

#### Классификация моделей пожара

Международный опыт подсказывает необходимость создания новой классификации программного обеспечения, учитывающей ранее разработанные классификации программного обеспечения пожарной безопасности. Наиболее распространенные программы описывают распространение дыма и теплоперенос в помещениях. Известно, что эти программы используют зонные и полевые модели<sup>2</sup> [6–8, 12–16]. Но существуют также и другие типы

моделей, соответствующие областям их применения, такие как модели расчета огнестойкости конструкции или показаний пожарных детекторов (тепловых или дымовых). С учетом этих особенностей классификация областей применения моделей [1] выглядит следующим образом:

- модели расчета огнестойкости конструкций,
- зонные модели,
- полевые модели,
- модели расчета времени эвакуации,
- модели расчета времени срабатывания детекторов.

Количество областей применения было сокращено до пяти, с объединением зонных и полевых моделей в более общую группу под названием «Тепловые модели пожара». Таким образом, получается классификация в зависимости только от области применения программного обеспечения, а не от математического метода, используемого для решения различных задач.

В этой классификации можно выделить две разные группы — по типу решаемых задач:

- оценка поведения конструкции при высокотемпературном и механическом воздействии в условиях реального пожара ( $R$ );
- определение требований, которым должны соответствовать конструкции для обеспечения безопасности в случае пожара (с использованием модели эвакуации, модели показаний детекторов, смешанных моделей).

**Таблица 2.** Программное обеспечение на основе упрощенных тепловых моделей пожара**Table 2.** Software based on simplified thermal fire models

Программное обеспечение Software	Страна Country	Краткое описание Description
DIFISEK-CaPaFi	Люксембург Luxembourg	Расчет температуры в стальном элементе конструкции (от одного до пяти местных источников огня). Основано на Еврокоде 1, часть 1–2 и Еврокоде 3, часть 1–2 Calculation of the temperature in a steel construction element (one to five local fire sources). Based on Eurocode 1, part 1-2, and Eurocode 3, part 1-2
DIFISEK-EN 1991-1-2	Люксембург Luxembourg	Расчет параметрических кривых «температура–время» в отсеке и температуры защищенного и незащищенного стального элемента. Основано на Еврокоде 1, часть 1–2 (приложение А) и Еврокоде 3, часть 1–2 Analysis of temperature-time parameter curves of protected and unprotected steel elements. Based on Eurocode 1, part 1-2 (appendix A) and Eurocode 3, part 1-2
DIFISEK-TEFINAF	Люксембург Luxembourg	Расчет температур стальных ферм перекрытия в зависимости от времени и расстояния до источника огня, основано на отчете EUR 18868 «Разработка правил проектирования стальных конструкций в условиях естественных пожаров в больших отсеках» Calculation of temperatures of steel floor trusses depending on time and distance to the source of fire, based on report EUR 18868 “Development of design rules for steel structures exposed to natural fires in large compartments”
Parametrická teplotní křivka	Чехия Czech Republic	Параметрическая температурная кривая при пожаре в помещении Parameter temperature curve for an indoor fire
Přestup tepla	Чехия Czech Republic	Расчет температуры стальных элементов при пожаре с использованием Еврокода 3, часть 1–2. Можно использовать стандартную, углеводородную или параметрическую кривую Calculation of the temperature of steel elements exposed to the fire using Eurocode 3, part 1-2. Standard, hydrocarbon or parameter curves can be used

### Тепловые модели пожара

Зарубежными экспертами разработаны различные типы программного обеспечения для оценки поведения конструкций при высокотемпературном воздействии при пожаре. При разработке использован Еврокод 1<sup>3</sup>, описывающий тепловые и механические воздействия для расчета конструкции зданий в условиях пожара.

Таким образом, тепловые модели пожаров можно разделить на следующие группы:

- упрощенные тепловые модели: модели пожаров в помещениях и локализованных пожаров;
- усовершенствованные тепловые модели: зонные и полевые модели.

### Упрощенные тепловые модели пожаров

Эти модели имеют ограниченную область применения, но могут быть использованы для расчета

<sup>3</sup> Еврокод 1. Воздействия на конструкции. Часть 1–2. Общие воздействия. Воздействия для определения огнестойкости (Eurocode 1: Actions on structures — Part 1-2: General actions — Actions on structures exposed to fire).

температур конструкций. В этих моделях для пожаров в помещениях предполагается равномерное распределение температуры, а для локализованных пожаров — неравномерное. Различные виды программного обеспечения на основе упрощенных тепловых моделей пожаров представлены в табл. 2.

### Усовершенствованные тепловые модели пожара

**Зонная модель** — это компьютерная модель, для создания которой исследуемое помещение делится на различные контрольные объемы или зоны. В наиболее распространенных зонных моделях помещение разделено на две зоны: верхнюю горячую и нижнюю холодную. Частным случаем зонных моделей являются модели с одной зоной, основанные на том предположении, что границы между зонами нет, и помещение можно рассматривать как объем с однородными свойствами. Некоторые зонные модели имеют возможность переключения с двухзонной модели на однозонную при достижении требуемых условий.

Чтобы иметь возможность использовать уравнения, которые являются основой этих моделей, пожарный эксперт должен сделать несколько допущений. Многие из этих допущений основаны на результатах экспериментов. Основные предположения:

- дымовой слой распределяется на два отдельных слоя (как это происходит на реальных пожарах). Слои также предполагаются однородными (что не соответствует действительности, но различия внутри каждого слоя настолько малы по сравнению с различиями между слоями, что в результате это предположение является приемлемым);
- конвективная струя осуществляет перенос тепла и частиц дыма в верхнюю зону;
- большая часть пожарной нагрузки помещения не учитывается в расчете;
- теплоперенос рассматривается для границ помещения, а не его внутреннего содержимого.

Входными данными для создания модели являются геометрия помещения, конструкции помещения (включая все стены, полы и потолок), количество вентиляционных отверстий и их размеры, характеристики пожарной нагрузки помещения.

Выходные данные представляют собой прогноз времени активации спринклера и пожарного извещателя, времени до пожара-вспышки, температур верхнего и нижнего слоев, высоты слоя дыма.

С помощью программного обеспечения, моделирующего теплоперенос и распространение дыма, определяют температуру газа, чтобы на следующем этапе спрогнозировать температуру элементов конструкции.

В **полевой модели** исследуемый объект разбивается на трехмерную сетку — множество элементарных контрольных объемов. Эти контрольные объемы аналогичны тем, которые используются при моделировании зон, однако там, где зонная модель может иметь две или три зоны, модель CFD (computational fluid dynamics) будет иметь сотни тысяч контрольных объемов.

Моделирование CFD решает дифференциальные уравнения (уравнения Навье-Стокса) для каждого контрольного объема. Этот подход намного сложнее и требует больше времени для расчетов, но позволяет реализовать более сложную геометрию объекта.

Входными данными являются геометрия помещения, конструкции помещения (включая все стены, полы и потолок), количество вентиляционных отверстий и их размеры, характеристики пожарной нагрузки, реакции горения и продуктов сгорания, параметры турбулентности и излучения.

Выходные данные представляют собой параметры распространения дыма и теплопереноса, прогноз времени срабатывания спринклера и пожарного извещателя, времени до пожара-вспышки, температуры, скорости распространения и высоты слоя дыма.

Вычисления с использованием моделей CFD требуют большого количества времени, но модели CFD могут использоваться для помещений со сложной геометрией (например, изогнутые стены). Моделирование CFD широко применяется и в других областях (например, механика, авиакосмическая промышленность и т.д.).

Программное обеспечение с использованием моделей CFD также анализирует теплоперенос и распространение дыма в условиях пожара и в результате определяет температуру элементов конструкции.

#### **Модели для расчета огнестойкости конструкций**

Эти модели имитируют поведение строительных конструкций здания в условиях пожара. Их использование позволяет определить время обрушения конструктивных элементов.

Как и в случае тепловых моделей пожара, существуют различные типы программного обеспечения в зависимости от метода, используемого для оценки поведения конструкции в условиях пожара. Для их классификации применяются Еврокоды 1 и 3.

Таким образом, программные комплексы с использованием модели огнестойкости конструкции также могут быть разделены на упрощенные и усовершенствованные программные средства определения огнестойкости конструкции.

Входными данными обычно являются свойства материала и граничные условия элементов конструкции (включая пожарные нагрузки).

Выходные данные представляют собой время обрушения, интенсивность нагрузки и величину смещения конструкции [19].

**Упрощенные модели расчета огнестойкости конструкций** (табл. 3) рассчитывают структурное поведение элементов индивидуально, рассматривая каждый структурный элемент изолированно от остальной части конструкции, и основаны на упрощенных методах. Некоторые из них включены в зонные или полевые модели.

**Усовершенствованные модели расчета огнестойкости конструкций** (табл. 4) могут представлять структуру частично или целиком, в статическом или динамическом режимах и определять время возможного разрушения всего здания. Эти программы используют метод конечных элементов.

Таблица 3. Программное обеспечение на основе упрощенных моделей огнестойкости конструкций

Table 3. Software based on simplified models of fire resistance of structures

Программное обеспечение Software	Страна Country	Краткое описание Description
AFCB	Люксембург Luxembourg	Расчет огнестойкости композитных балок в соответствии с Еврокодом 4 Analysis of fire resistance of composite beams according to Eurocode 4
AFCC	Люксембург Luxembourg	
CIRCON	Канада Canada	Расчет огнестойкости железобетонных балок с круглым поперечным сечением Analysis of fire resistance of reinforced concrete beams having round cross sections
COFIL	Канада Canada	Расчет огнестойкости пустотелых стальных профилей с заполнением неармированным бетоном Analysis of fire resistance of hollow steel profiles filled with unreinforced concrete
Elefir-EN	Португалия Бельгия Portugal Belgium	Расчет огнестойкости стальных конструкций в соответствии с англоязычной версией Еврокода 3 Analysis of fire resistance of steel structures according to the English language version of Eurocode 3
Elefir	Бельгия Belgium	Расчет огнестойкости стальных конструкций в соответствии с Еврокодом 3 Analysis of fire resistance of steel structures according to Eurocode 3
H-Fire	Германия Germany	Расчет огнестойкости композитных элементов в условиях пожара с использованием моделей на основе Еврокода 4, часть 1–2 Analysis of fire resistance of composite elements exposed to fire using models based on Eurocode 4, part 1-2
INSTAI	Канада Canada	Расчет огнестойкости пустотелых стальных балок круглого поперечного сечения с теплоизоляционным покрытием Analysis of fire resistance of round cross-section hollow steel beams having thermal insulation coating
INSTCO	Канада Canada	Расчет огнестойкости трубчатого стального профиля круглого поперечного сечения с бетонным заполнением Analysis of fire resistance of tubular steel round cross-section profile with concrete filling
POTFIRE	Франция France	Расчет огнестойкости пустотелых профилей с заполнением бетоном в соответствии с Еврокодом 4 Analysis of fire resistance of hollow profiles filled with concrete in accordance with Eurocode 4
RCCON	Канада Canada	Расчет огнестойкости железобетонных балок с прямоугольным поперечным сечением Analysis of fire resistance of reinforced concrete beams having a rectangular cross section
RECTST	Канада Canada	Расчет огнестойкости пустотелых стальных балок прямоугольного поперечного сечения с теплоизоляционным покрытием Analysis of fire resistance of hollow steel beams having a rectangular cross section and thermal insulation coating
SQCON	Канада Canada	Расчет огнестойкости квадратных железобетонных балок Analysis of fire resistance of square reinforced concrete beams
WSHAPS	Канада Canada	Расчет огнестойкости защищенных стальных двутавров Analysis of fire resistance of protected steel I-beams
Požární odolnost	Чехия Czech Republic	Расчет огнестойкости стальных элементов в условиях пожара на основе Еврокода 3, часть 1–2 Analysis of fire resistance of steel elements exposed to fire pursuant to Eurocode 3, part 1-2

**Таблица 4.** Программное обеспечение на основе усовершенствованных моделей огнестойкости конструкций

**Table 4.** Software based on advanced models of fire resistance of structures

Программное обеспечение Software	Страна Country	Краткое описание Description
ABAQUS	США USA	Стандартный метод конечных элементов Standard finite element method
ALGOR		
ANSYS		
COSMOS		
NASTRAN		
BoFire	Германия Germany	Расчет огнестойкости для стальных, бетонных и композитных конструкций на основе Еврокода 4, часть 1–2 Analysis of fire resistance for steel, concrete and composite structures based on Eurocode 4, part 1-2
BRANZ-TR8	Новая Зеландия New Zealand	Расчет огнестойкости для перекрытий из бетона или напряженно-армированного бетона Analysis of fire resistance for concrete or prestressed reinforced concrete floor slabs
CEFICOSS	Бельгия Belgium	Расчет огнестойкости Analysis of fire resistance
CMPST	Франция France	Расчет механической устойчивости при высокотемпературном воздействии Analysis of mechanical stability in case of high temperature exposure
COMPSL	Канада Canada	Расчет температур многослойных плит в условиях пожара Analysis of multilayer slab temperatures in case of fire exposure
FASBUS	США USA	Расчет механической устойчивости в условиях пожара Analysis of mechanical stability in case of fire exposure
FIRES-T3	США USA	Теплоперенос (метод конечных элементов) Heat transfer (finite element method)
HSLAB	Швеция Sweden	Температуры перехода в нагреваемой балке из одного или нескольких материалов Transition temperatures in a heated beam made of one or more materials
LENAS	Франция France	Расчет механической устойчивости стальных балок в условиях пожара Analysis of mechanical stability of steel beams in case of fire exposure
SAFIR	Бельгия Belgium	Динамический и механический анализ конструкций в условиях пожара Dynamic and mechanical analysis of structures in case of fire exposure
SAWTEF	США USA	Анализ деревянных конструкций, соединенных металлическими пластинами, в условиях пожара Analysis of wooden structures connected by metal plates in case of fire exposure
STELA	Великобритания UK	Трехмерная модель для анализа реакции элементов конструкции на горючие газы Three-dimensional model designated for the analysis of the response of structural elements to combustible gases
TASEF	Швеция Sweden	Анализ высокотемпературного воздействия на конструкции в условиях пожара методом конечных элементов Using the finite element method to perform the analysis of high-temperature exposure of structures on fire

Программное обеспечение Software	Страна Country	Краткое описание Description
TCSLBM	Канада Canada	Двумерное распределение температуры для сборных конструкций из бетонных плит/балок в условиях пожара Two-dimensional temperature distribution for structures made of precast concrete slabs / beams on fire
THELMA	Великобритания UK	Анализ высокотемпературного воздействия на конструкции в условиях пожара методом конечных элементов Using the finite element method to perform the analysis of high temperature exposure of structures on fire
VULCAN	Великобритания UK	Моделирование поведения стальных и композитных каркасных конструкций, включая перекрытия, в условиях пожара Modeling the behaviour of steel and composite frame structures, including slabs, in case of fire exposure
WALL2D	Канада Canada	Модель теплопереноса для деревянных стен в условиях пожара Heat transfer model for wooden walls in case of fire exposure
Ocel požár	Чехия Czech Republic	Расчет огнестойкости стальных конструкций в условиях пожара на основании Еврокода 3, часть 1–2 Analysis of fire resistance of steel structures on fire based on Eurocode 3, part 1-2

Дополнительно при расчете огнестойкости конструкций используются следующие модели.

*Эвакуационные модели* прогнозируют время эвакуации из здания и местоположение областей скопления людей во время эвакуации. Эти модели используются совместно с зонными или полевыми моделями, чтобы определить время до появления неблагоприятных для эвакуации условий в здании.

Входными данными обычно являются: заполненность здания людьми, геометрия здания (выходы, лестницы, лифты, коридоры и т.д.).

Выходные данные: время эвакуации здания и места скопления людей.

*Модели реагирования детектора* определяют время срабатывания противопожарных устройств: тепловых детекторов, спринклеров или детекторов дыма. Эти модели используют зонный подход для оценки распространения дыма и теплопереноса и подмодели для определения реакции тепловых детекторов на поток тепла и дыма (т.е. упрощенное моделирование для оценки теплопереноса к элементу детектора и определения времени активации).

Входными данными являются характеристики анализируемого элемента детектора, его местоположение и скорость тепловыделения при пожаре. Для самых сложных моделей требуются геометрия отсеков и их материалы.

Выходные данные представляют собой время срабатывания устройства и в самых сложных мо-

делях — действия систем пожарной безопасности после срабатывания устройства.

## Выводы

Основными аспектами программного обеспечения для решения задач пожарной безопасности являются:

- методология расчета (используемые физико-математические модели);
- документация;
- интерфейс.

Наиболее важный аспект методологии расчета представляют собой формулы, используемые программным обеспечением для выполнения расчетов, основанные на физических законах и экспериментальных данных. Надежность программного обеспечения существенно зависит от точности и достоверности этих формул. Кроме того, при расчете невозможно учесть все переменные, связанные с событием, поэтому для выполнения вычислений необходимо сделать определенные предположения. Это ограничивает универсальность программного обеспечения.

Основными документами при использовании программного обеспечения являются руководство пользователя, технические руководства, примеры применения, определяющие корректность использования программного обеспечения и, следовательно, надежность и точность полученных результатов.

Пользовательский интерфейс имеет большое значение в ходе применения программного обеспечения. Корректный программный интерфейс позволяет легко задавать входные данные, грамотная отчетность упрощает анализ результатов, а хорошая графика дает лучшее видение моделируемого события.

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Olenick S.M., Carpenter D.J. An updated international survey of computer models for fire and smoke // *Journal of Fire Protection Engineering*. 2003. Vol. 13. Issue 2. Pp. 87–110. DOI: 10.1177/1042391503013002001
2. Friedman R. An international survey of computer models for fire and smoke // *Journal of Fire Protection Engineering*. 1992. Vol. 4. Issue 3. Pp. 81–92. DOI: 10.1177/104239159200400301
3. Janssens M.L. Evaluating computer fire models // *Journal of Fire Protection Engineering*. 2002. Vol. 13. P. 19.
4. Twilt L., Hass R., Klingsch W., Edwards M., Dutta D. Design guide for structural hollow section columns exposed to fire. Köln : Verlag TÜV Rheinland, 1994. 98 p.
5. Peacock R.D., Reneke P.A., Jones W.W., Bukowski R.W., Forney G.P. A User's Guide for FAST: Engineering tools for estimating fire growth and smoke transport. Special Publication 921. 2000 Edition. Gaithersburg : National Institute of Standards and Technology, 2000. 192 p. DOI: 10.6028/nist.sp.921e2000
6. Portier R.W., Reneke P.A., Jones W.W., Peacock R.D. A User's Guide for CFAST Version 1.6. NISTIR 4985. Gaithersburg : National Institute of Standards and Technology, 1992. DOI: 10.6028/nist.ir.4985
7. Jones W.W., Forney G.P., Peacock R.D., Reneke P.A. A technical reference for CFAST: an engineering tool for estimating fire growth and smoke transport. Technical Note 1431. Gaithersburg : National Institute of Standards and Technology, 2000. 178 p. DOI: 10.6028/nist.tn.1431
8. Morente F., de la Quintana J., Wald F. PART 4: Software for fire design. 2015.
9. Dumont F., Bostrom L., Lukomski M., van den Berg G. Report of the EGOLF Round-Robin Nr. TC2 14-1 in Fire Resistance Testing. The European Group of Laboratories for Fire Testing (EGOLF), 2015.
10. Пожары и пожарная безопасность в 2017 году : статистический сборник / под общ. ред. Д.М. Гордиенко. М. : ВНИИПО, 2018. 125 с.
11. Еремина Т.Ю., Фадеев В.Е. К оценке возможности внедрения экранных стен на объектах с массовым пребыванием людей // *Пожаровзрывобезопасность/Fire and Explosion Safety*. 2018. Т. 27. № 2–3. С. 57–66. DOI: 10.18322/PVB.2018.27.02-03.57-66
12. Korhonen T. Fire Dynamics Simulator with Evacuation: FDS+Evac. Technical Reference and User's Guide (FDS 6.6.0, Evac 2.5.2, DRAFT). VTT Technical Research Centre of Finland, 2018. 115 p.
13. McGrattan K., McDermott R., Weinschenk C., Overholt K., Hostikka S., Floyd J. Fire Dynamics Simulator. Technical reference guide. Volume 1: Mathematical Model. NIST Special Publication 1018. Sixth Edition. Gaithersburg : National Institute of Standards and Technology, 2013. 149 p. DOI: 10.6028/nist.sp.1018e6
14. McGrattan K., McDermott R., Weinschenk C., Overholt K., Hostikka S., Floyd J. Fire Dynamics Simulator. Technical reference guide. Volume 2: Verification. NIST Special Publication 1018. Sixth Edition. Gaithersburg : National Institute of Standards and Technology, 2013. 170 p.
15. McGrattan K., McDermott R., Weinschenk C., Overholt K., Hostikka S., Floyd J. Fire Dynamics Simulator. Technical reference guide. Volume 3: Validation. NIST Special Publication 1018. Sixth Edition. Gaithersburg : National Institute of Standards and Technology, 2013. 509 p.
16. Forney G.P. Smokeview, a tool for visualizing fire dynamics simulation data. Volume I: User's Guide. NIST Special Publication 1017-1. Sixth Edition. Gaithersburg : National Institute of Standards and Technology, 2013. 185 p.
17. Шебеко Ю.Н., Зубань А.В., Шебеко А.Ю. Расчет фактического предела огнестойкости незащищенных стальных конструкций при различных температурных режимах пожара // *Пожаровзрывобезопасность/Fire and Explosion Safety*. 2019. Т. 28. № 6. С. 29–34. DOI: 10.18322/PVB.2019.28.06.29-34
18. Фадеев В.Е. Исследование предела огнестойкости экранных стен // *Пожарная безопасность*. 2019. № 2. С. 49–53.
19. Еремина Т.Ю., Портнов Ф.А. Проблемы и перспективы в области огнестойкости деревянных конструкций для высотных зданий // *Пожаровзрывобезопасность/Fire and Explosion Safety*. 2020. Т. 29. № 2. С. 34–43. DOI: 10.18322/PVB.2020.29.02.34-43

### REFERENCES

1. Olenick S.M., Carpenter D.J. An updated international survey of computer models for fire and smoke. *Journal of Fire Protection Engineering*. 2003; 13(2):87-110. DOI: 10.1177/1042391503013002001
2. Friedman R. An international survey of computer models for fire and smoke. *Journal of Fire Protection Engineering*. 1992; 4(3):81-92. DOI: 10.1177/104239159200400301
3. Janssens M.L. Evaluating computer fire models. *Journal of Fire Protection Engineering*. 2002; 13:19.
4. Twilt L., Hass R., Klingsch W., Edwards M., Dutta D. *Design Guide for Structural Hollow Section Columns Exposed to Fire*. Köln, Verlag TÜV Rheinland, 1994; 98.

5. Peacock R.D., Reneke P.A., Jones W.W., Bukowski R.W., Forney G.P. *A User's Guide for FAST: Engineering Tools for Estimating Fire Growth and Smoke Transport. Special Publication 921. 2000 Edition.* Gaithersburg, National Institute of Standards and Technology, 2000; 192. DOI: 10.6028/nist.sp.921e2000
6. Portier R.W., Reneke P.A., Jones W.W., Peacock R.D. *A User's Guide for CFAST Version 1.6. NISTIR 4985.* Gaithersburg, National Institute of Standards and Technology, 1992. DOI: 10.6028/nist.ir.4985
7. Jones W.W., Forney G.P., Peacock R.D., Reneke P.A. *A Technical Reference for CFAST: An Engineering Tool for Estimating Fire Growth and Smoke Transport. Technical Note 1431.* Gaithersburg, National Institute of Standards and Technology, 2000; 178. DOI: 10.6028/nist.tn.1431
8. Morente F., de la Quintana J., Wald F. *PART 4: Software for fire design.* 2015.
9. Dumont F., Bostrom L., Lukomski M., van den Berg G. *Report of the EGOLF Round-Robin Nr. TC2 14-1 in Fire Resistance Testing.* The European Group of Laboratories for Fire Testing (EGOLF), 2015.
10. *Fires and Fire Safety in 2017: Statistical book* / ed. D.M. Gordienko. Moscow, VNIPO Publ., 2018; 125. (rus.).
11. Eremina T.Yu., Fadeev V.E. To the assessment of the possibility of the introduction of curtain walling on objects with mass stay of people. *Pozharovzryvobezopasnost/Fire and Explosion Safety.* 2018; 27(2-3):57-66. (rus.). DOI: 10.18322/PVB.2018.27.02-03.57-66
12. Korhonen T. *Fire Dynamics Simulator with Evacuation: FDS+Evac. Technical Reference and User's Guide (FDS 6.6.0, Evac 2.5.2, DRAFT).* VTT Technical Research Centre of Finland, 2018; 115.
13. McGrattan K., McDermott R., Weinschenk C., Overholt K., Hostikka S., Floyd J. *Fire Dynamics Simulator: Technical Reference Guide. Volume 1: Mathematical Model. NIST Special Publication 1018. Sixth Edition.* Gaithersburg, National Institute of Standards and Technology, 2013; 149. DOI: 10.6028/nist.sp.1018e6
14. McGrattan K., McDermott R., Weinschenk C., Overholt K., Hostikka S., Floyd J. *Fire Dynamics Simulator: Technical Reference Guide. Volume 2: Verification. NIST Special Publication 1018. Sixth Edition.* Gaithersburg, National Institute of Standards and Technology, 2013; 170.
15. McGrattan K., McDermott R., Weinschenk C., Overholt K., Hostikka S., Floyd J. *Fire Dynamics Simulator: Technical Reference Guide. Volume 3: Validation. NIST Special Publication 1018. Sixth Edition.* Gaithersburg, National Institute of Standards and Technology, 2013; 509.
16. Forney G.P. *Smokeview, A Tool for Visualizing Fire Dynamics Simulation Data. Volume I: User's Guide. NIST Special Publication 1017-1. Sixth Edition.* Gaithersburg, National Institute of Standards and Technology, 2013; 185.
17. Shebeko Yu.N., Zuban A.V., Shebeko A.Yu. An evaluation of an actual fire resistance limit of non-protected steel structures for different temperature regimes of fires. *Pozharovzryvobezopasnost/Fire and Explosion Safety.* 2019; 28(6):29-34. (rus.). DOI: 10.18322/PVB.2019.28.06.29-34
18. Fadeev V.E. Study of fire resistance of screen walls. *Fire Safety.* 2019; 2:49-53. (rus.).
19. Eremina T.Yu., Portnov F.A. Problems and perspectives of fire resistance for wooden constructions in high-storey buildings. *Pozharovzryvobezopasnost/Fire and Explosion Safety.* 2020; 29(2):34-43. (rus.). DOI: 10.18322/PVB.2020.29.02.34-43

Поступила 19.04.2020, после доработки 15.05.2020;

принята к публикации 28.05.2020

Received April 19, 2020; Received in revised form May 15, 2020;

Accepted May 28, 2020

### Информация об авторах

**ЕРЕМИНА Татьяна Юрьевна**, д-р техн. наук, профессор, профессор кафедры комплексной безопасности в строительстве, Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет, г. Москва, Российская Федерация; Author ID: 274777, ORCID: 0000-0003-1427-606X; e-mail: main@stopfire.ru

**КОРОЛЬЧЕНКО Дмитрий Александрович**, канд. техн. наук, заведующий кафедрой комплексной безопасности в строительстве, директор Института комплексной безопасности в строительстве, Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет, г. Москва, Российская Федерация; Author ID: 352067, Scopus Author ID: 55946060600; ResearcherID: E-1862-2017; ORCID: 0000-0002-2361-6428; e-mail: KorolchenkoDA@mgsu.ru

### Information about the authors

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

**Dmitriy A. KOROLCHENKO**, Cand. Sci. (Eng.), Head of Department of Integrated Safety in Civil Engineering, Head of Institute of Integrated Safety in Construction, Moscow State University of Civil Engineering (National Research University), Moscow, Russian Federation; Author ID: 352067, Scopus Author ID: 55946060600; ResearcherID: E-1862-2017; ORCID: 0000-0002-2361-6428; e-mail: KorolchenkoDA@mgsu.ru

## Исследование огнестойкости стальных конструкций покрытия складского здания в условиях различного температурного воздействия

© Д.А. Минайлов✉

Судебно-экспертное учреждение Федеральной противопожарной службы «Испытательная пожарная лаборатория» по Калининградской области (Россия, 236010, г. Калининград, ул. Бассейная, д. 35а)

### АННОТАЦИЯ

**Введение.** В процессе проектирования складских зданий требуется оценить соответствие фактических пределов огнестойкости строительных конструкций требуемым пределам огнестойкости с учетом принятых проектных решений. Определение пределов огнестойкости (фактических) строительных конструкций производится в условиях воздействия «стандартного» температурного режима, применение которых может привести к закладыванию в проект завышенного запаса по огнестойкости и к недооценке теплового воздействия в условиях реального пожара.

**Цели и задачи.** Цель исследования — оценка сходимости «стандартного» температурного режима и возможных «реальных» температурных режимов пожаров в современных складских зданиях, а также соответствия фактических пределов огнестойкости возмещенной цели были решены следующие задачи: проведено математическое моделирование развития реального пожара полевым методом в складском здании при различной пожарной нагрузке, а также моделирование прогрева несущих конструкций покрытия при «стандартном» температурном режиме и полученных в процессе моделирования «реальных» температурных режимах пожара; определены требуемые пределы огнестойкости несущих строительных конструкций покрытия через эквивалентную продолжительность пожара.

**Методы.** В качестве объекта исследования было выбрано складское здание типовой формы размерами 12×12×6,5 м. В здании предусмотрены ворота размером 4×4 метра в количестве 2 шт. и входная дверь размером 1×2 м. В стенах здания размещены 32 окна размерами 0,7×1 м. Покрытие — беспрогонная плоская кровля на металлических фермах покрытия. Параметры пожарной нагрузки при математическом моделировании принимались по справочным данным Ю.А. Кошмарова. Рассмотрено 12 видов типовой пожарной нагрузки. Для математического моделирования «реальных» температурных режимов пожара использовался программный комплекс Fire Dynamics Simulator (FDS), реализующий полевую (дифференциальную) математическую модель. Для математического моделирования процесса прогрева стальных строительных конструкций применялся конечно-разностный метод решения уравнения теплопроводности Фурье при внешней и внутренней нелинейности, реализованный в программном комплексе ANSYS Mechanical.

**Результаты и обсуждение.** Результаты математического моделирования в программном комплексе FDS показывают, что температурное воздействие, оказываемое на конструкцию при «стандартном» температурном режиме и таких пожарных нагрузках, как кабели и провода, индустриальное масло, этиловый спирт, оказалось ниже, что указывает на недооценку теплового воздействия на конструкцию. Результаты моделирования прогрева конструкций продемонстрировали, что время прогрева фермы покрытия до 400...700 °С для указанных пожарных нагрузок (кабели и провода, индустриальное масло, этиловый спирт) меньше времени, полученного в результате стандартных испытаний, что указывает на изначальное занижение фактической огнестойкости стальных конструкций покрытия при проектировании складских зданий.

**Заключение.** Предположение о недооценке теплового воздействия при «стандартном» температурном режиме на стальные конструкции современных складских комплексов подтвердилось для 3 из 12 рассмотренных пожарных нагрузок, а именно: кабелей и проводов, индустриального масла, этилового спирта.

**Ключевые слова:** компьютерное моделирование; FDS; ANSYS; пожарная нагрузка; температурный режим пожара; оценка предела огнестойкости; требуемый предел огнестойкости; эквивалентная продолжительность пожара

**Для цитирования:** Минайлов Д.А. Исследование огнестойкости стальных конструкций покрытия складского здания в условиях различного температурного воздействия // Пожаровзрывобезопасность/Fire and Explosion Safety. 2020. Т. 29. № 3. С. 54–65. DOI: 10.22227/PVB.2020.29.03.54-65

✉ Минайлов Денис Александрович, e-mail: minailov-denis@mail.ru

## Investigation of fire resistance of steel structures covering a warehouse building under different temperature conditions

© Denis A. Minailov✉

Forensic institutions Federal Fire Service “Fire testing laboratory” of Kaliningrad Region (Russian Federation, 236010, Kaliningrad, Basseynaya St., 35 a)

### ABSTRACT

**Introduction.** In the process of designing warehouse buildings, taking into account the adopted design decisions, it is required to assess the compliance of the actual fire resistance limits of building structures with the required fire resistance

limits. The fire resistance limits of the (actual) building structures are determined under the influence of a “standard” temperature regime, the use of which can lead to both laying an overestimated fire resistance margin in a project and underestimating the thermal effect in a “real” fire.

**Aims and purposes.** The purpose of the study is to assess the convergence of the “standard” temperature regime and possible “real” temperature regimes of fires in modern warehouse buildings, as well as the correspondence of actual fire resistance limits to the effects of “real” fires. To achieve this goal, the following tasks were solved: mathematical modeling of the development of a “real” fire by the field method in a warehouse building at different fire loads was carried out, as well as modeling of heating of the supporting structures of the coating according to the standard temperature regime and the “real” temperature conditions of the fire obtained during the simulation; the required fire resistance limits of the bearing building structures of the coating are determined through the equivalent duration of the fire.

**Methods.** A storage building of a standard form with dimensions of 12×12×6.5 m was chosen as the object of the study. The building has a 4×4 meter gate in the amount of 2 pieces and an entrance door of 1×2 meter size. Within the walls of the building are 32 windows measuring 0.7×1 meter. Coverage — an impassable flat roof over metal trusses. The parameters of the fire load during mathematical modeling were taken according to the reference data of Yu.A. Koshmarov 12 types of typical fire load stored in warehouse buildings are considered. For mathematical modeling of “real” temperature fires, the “Fire Dynamics Simulator” (FDS) software package was used, which implements a field (differential) mathematical model. For mathematical modeling of the heating process of steel building structures, the finite-difference method for solving the Fourier heat equation with external and internal nonlinearity was used, implemented in the ANSYS Mechanical software package.

**Results and discussion.** The results of modeling in the FDS software package show that the temperature impact on the structure according to the standard temperature regime for fire loads: cables+wires, industrial oil, ethyl alcohol was less, which indicates an underestimation of the thermal impact on the structure. The results of modeling the heating of structures showed that the heating time of the coating truss is up to 400–700 °C for fire loads: cables+wires, industrial oil, ethyl alcohol less than the time obtained from standard tests, which indicates an initial underestimation of the actual fire resistance of steel structures of the coating when designing warehouse buildings.

**Conclusions.** The assumption that the thermal impact of the standard temperature regime on the steel structures of modern warehouse complexes was underestimated was confirmed for 3 of the 12 fire loads considered, namely: cables+wires, industrial oil, ethyl alcohol.

**Keywords:** computer simulation; FDS; ANSYS; fire load; fire temperature; fire resistance rating; required fire resistance; equivalent fire duration

**For citation:** Minailov D.A. Investigation of fire resistance of steel structures covering a warehouse building under different temperature conditions. *Pozharovzryvobezopasnost/Fire and Explosion Safety*. 2020; 29(3):54-65. DOI: 10.22227/PVB.2020.29.03.54-65

✉ Denis Aleksandrovich Minailov, e-mail: minailov-denis@mail.ru

## Введение

В последние десятилетия в России при строительстве складских зданий стали активно применять стальные конструкции [1], которые, обладая рядом преимуществ перед традиционными строительными материалами, имеют один существенный недостаток — быстро теряют несущую способность при воздействии высоких температур, как правило, выше 500 °C [2, 3].

Статистические данные по пожарам [4]<sup>1</sup> показывают, что за последние 9 лет систематически происходят пожары в складских зданиях. В период с 2010 по 2019 гг. количество пожаров составило 14 464, количество погибших — 259 человек, количество травмированных — 450 человек, общий ущерб — 28,9 млрд руб. Анализ произошедших за этот период пожаров показывает, что низкий предел огнестойкости несущих металлических конструкций покрытия приводит во многих случаях к его обрушению на значительной площади еще до приезда пожарных подразделений. Такая ситуа-

ция наблюдается, в основном, в зданиях II–V степеней огнестойкости, к конструкциям покрытия которых согласно требованиям Федерального закона «Технический регламент о требованиях пожарной безопасности» от 11 июля 2008 г. № 123-ФЗ либо предъявляются требования по потере несущей способности в течение 15 мин, либо такие требования отсутствуют. Именно в складских зданиях II–V степеней огнестойкости происходит подавляющее количество пожаров, сопровождающихся гибелью и травмированием людей, а также большим материальным ущербом (рис. 1)<sup>1</sup>, что указывает на низкий уровень противопожарной защиты таких зданий, связанный, в том числе и с ошибками, допущенными при проектировании.

В настоящее время соответствие конструкций требованиям Федерального закона № 123-ФЗ по огнестойкости подтверждается экспериментально по ГОСТ 30247.1–94 «Конструкции строительные. Методы испытаний на огнестойкость. Несущие и ограждающие конструкции» или расчетными методами [2, 3] в условиях воздействия «стандартного» температурного режима по ГОСТ 30247.0–94 «Конструкции строительные. Методы испытаний на огнестойкость. Общие требования».

<sup>1</sup> Федеральный банк данных «ПОЖАРЫ». URL: <http://www.vnii-po.ru/institut/informatsionnye-sistemy-reestry-bazy-i-banki-danny/federalnyy-bank-dannykh-pozhary/> (дата обращения: 24.04.2020).

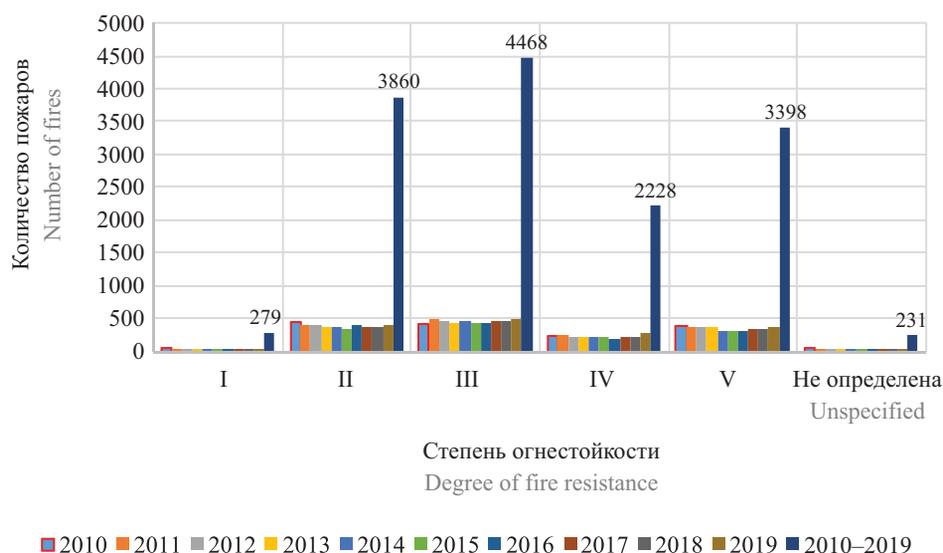


Рис. 1. Количество пожаров в складских зданиях за период с 2010 по 2019 гг.

Fig. 1. Number of fires in warehouse buildings between 2010 and 2019

«Стандартный» температурный режим является простым средством оценки огнестойкости строительных конструкций и не учитывает особенностей распространения и развития пожара в складских зданиях. Нередко в процессе проектирования и строительства крупных логистических центров (складов) с учетом технологических процессов, проходящих в них, динамика развития пожара и, следовательно, «реальные» температурные режимы могут существенно отличаться от «стандартного» [4–11]. Поэтому для подобных зданий, ввиду высокой стоимости и физической невозможности проведения натурных огневых испытаний здания или сооружений в целом, может применяться метод компьютерного моделирования развития пожара с помощью специализированных программных комплексов [12–14]. В настоящее время широко используются такие компьютерные программы, как Fire Dynamics Simulator (FDS), PHOENICS, FLUENT, SOFIE и отечественные разработки профессора С.В. Пузача [15], позволяющие решать дифференциальные уравнения (полевой метод) с учетом множества факторов, влияющих на динамику опасных факторов пожара (объемно-планировочные решения, вентиляция, автоматические установки пожаротушения (АУПТ), противодымная вентиляция, ветер, применяемые пожарными подразделениями огнетушащие вещества и др.).

#### Цели и задачи исследования

Цель исследования — оценка сходимости «стандартного» температурного режима и возможных «реальных» температурных режимов пожаров в современных складских зданиях, а также соответ-

ствия фактических пределов огнестойкости воздействию реальных пожаров.

Задачи исследования:

- провести математическое моделирование развития пожара в складском здании при различных пожарных нагрузках с оценкой температурного режима реального пожара;
- выполнить математическое моделирование прогрева несущих конструкций покрытия при «стандартном» температурном режиме и при полученных в процессе моделирования температурных режимах;
- определить эквивалентную продолжительность пожара для несущих конструкций покрытия.

#### Методы

Оценка огнестойкости стальных конструкций покрытия складских зданий производилась путем решения теплотехнической задачи прогрева в условиях нестационарного теплового воздействия при «стандартном» температурном режиме и в условиях температурного режима реального пожара. Для моделирования процесса прогрева стальных конструкций применялся конечно-разностный метод решения уравнения теплопроводности Фурье при внешней и внутренней нелинейности, реализованный в программном комплексе ANSYS mechanical. Моделирование температурных режимов реальных пожаров осуществлялось на программном комплексе Fire Dynamics Simulator (FDS), реализующем полевую математическую модель.

В качестве объекта исследования было выбрано складское здание типовой формы размерами 12×12×6,5 м (рис. 2), которые были приняты

исходя из анализа [16] объемно-планировочных решений 12 тыс. типовых зданий на стальном каркасе. Рассматриваемое складское здание входит в группу зданий площадью до 1000 м<sup>2</sup>, которые составляют около 35 % от общего количества рассмотренных зданий. В качестве несущих элементов здания использовались стальные конструкции. Покрытие — беспрогонная плоская кровля на металлических балках и фермах покрытия. В качестве несущих конструкций покрытия применены фермы из гнутосварных профилей по ГОСТ 30245–2003 «Профили стальные гнутые замкнутые сварные квадратные и прямоугольные для строительных конструкций. Технические условия». В здании предусмотрены ворота размером 4×4 м в количестве 2 шт. и входная дверь размером 1×2 м. В стенах здания размещены 32 окна размерами 0,7×1 м.

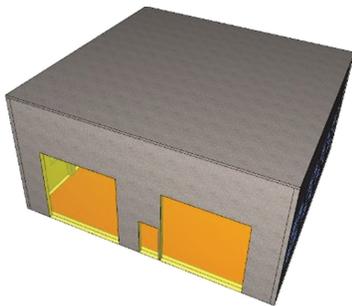


Рис. 2. Общий вид расчетной модели в программном комплексе FDS

Fig. 2. General view of the calculation model in the FDS software package

В качестве пожарной нагрузки по справочным данным [17, 18] были приняты: промтовары (текстильные изделия); резинотехнические изделия (резина и изделия из нее); склад льноволокна; склад оргстекла; этиловый спирт; кабели и провода (0,75 (АВВГ, АПВГ, ТПВ)+0,25 (КПРТ, ПР, ШРПС)); хлопок разрыхленный; склад бумаги

в рулонах; тара (древесина, картон, полистирол); радиоматериалы, промышленное масло, склад хлопка в тюках.

Объектом, моделирующим пожарную нагрузку в программном комплексе FDS, принималось вентиляционное отверстие. Для оценки температуры на поверхности стальных конструкций верхнего пояса ферм были расставлены датчики (термопары) с шагом 1 м (рис. 3), также измерялась среднеобъемная температура на высоте 4,7...6,5 м. При проведении расчетов ворота здания были открыты, окна закрыты.

В качестве рассматриваемой конструкции покрытия была принята ферма (рис. 4).

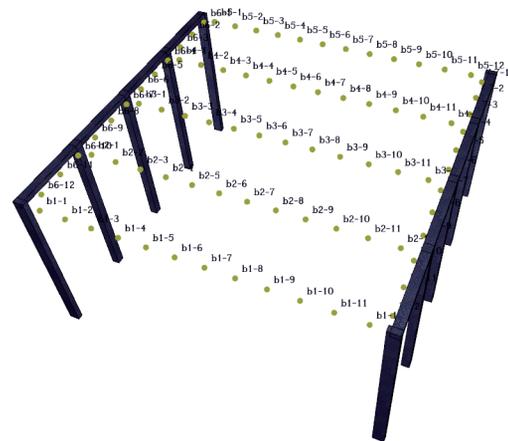


Рис. 3. Схема расстановки датчиков температуры (термопар)  
Fig. 3. The arrangement of temperature sensors (thermocouples)

Конструктивные элементы металлической фермы приведены в табл. 1.

Теплотехнический расчет производился согласно [2, 19] при условии изменения температуры нагревающей среды во времени по кривой стандартного пожара по ГОСТ 30247.0–94. Уравнение кривой стандартного пожара имеет вид:

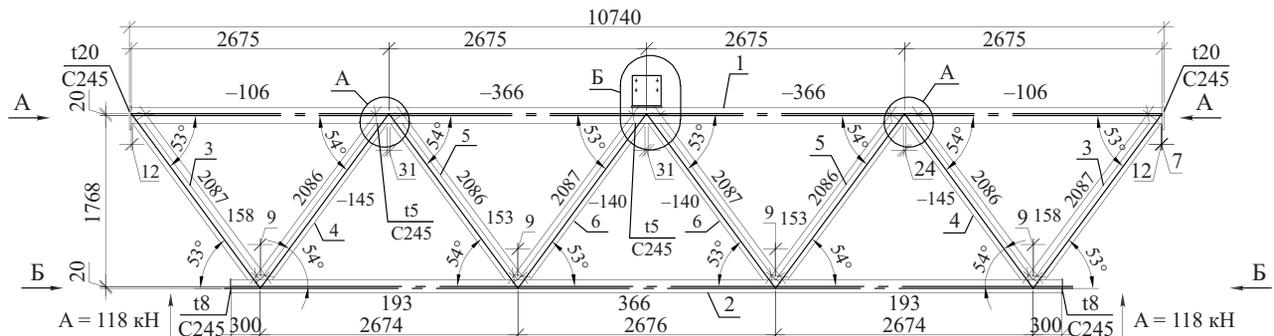


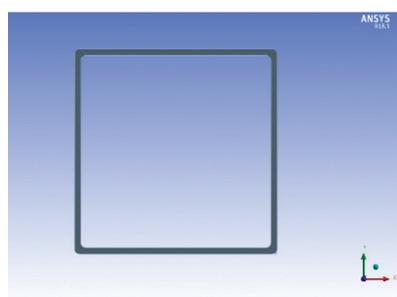
Рис. 4. Ферма покрытия

Fig. 4. Coating farm

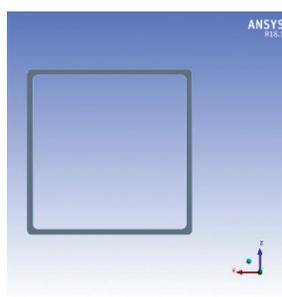
Таблица 1. Конструктивные элементы фермы

Table 1. Structural elements of the farm

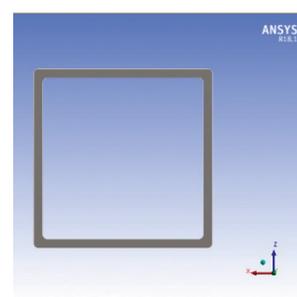
№ п/п No.	Сечение Section	Размеры конструкции, мм Construction dimensions, mm	Количество сторон обогрева The number of sides of the heating	Площадь поперечного сечения, мм <sup>2</sup> Cross-sectional area, mm <sup>2</sup>	Периметр обогреваемой поверхности, мм Perimeter of the heated surface, mm	Приведенная толщина металла, мм Reduced metal thickness, mm
1	□	160×160×5	4	3100	640	4,84
2	□	140×140×5	4	2700	560	4,82
3	□	100×100×5	4	1900	400	4,75



□ 160×160×5,  $L = 11\,240$  мм  
□ 160×160×5,  $L = 11\,240$  мм



□ 140×140×5,  $L = 8622$  мм  
□ 140×140×5,  $L = 8622$  мм



□ 100×100×5,  $L = 2086$  мм  
□ 100×100×5,  $L = 2086$  мм

Рис. 5. Модели элементов фермы покрытия в программном комплексе ANSYS mechanical

Fig. 5. Models of coating farm elements in the “ANSYS mechanical” software package

$$t_{b,\tau} = 345 \lg(0,133\tau + 1) + t_n, \quad (1)$$

где  $t_{b,\tau}$  — температура нагревающей среды, К;

$\tau$  — время, с;

$t_n$  — начальная температура нагревающей среды, К.

Коэффициент теплопередачи  $\alpha$ , Вт/(м<sup>2</sup>град), от нагревающей среды с температурой  $t_{b,\tau}$  поверхности с температурой  $t_0$  вычисляется по формуле (2):

$$\alpha = \alpha_k + \alpha_l = 29 + 5,77s_{np} \frac{\left(\frac{T_b}{100}\right)^4 - \left(\frac{T_0}{100}\right)^4}{T_b - T_0}, \quad (2)$$

где  $\alpha_k$  — конвективная составляющая;

$\alpha_l$  — лучистая составляющая;

$s_{np}$  — приведенная степень черноты: «нагревающая среда — поверхность конструкции».

В формуле (2) значение приведенной степени черноты:

$$s_{np} = \frac{1}{\frac{1}{s} + \frac{1}{s_0} - 1}, \quad (3)$$

где  $s$  — степень черноты огневой камеры печи,  $s = 0,85$ ;

$s_0$  — степень черноты обогреваемой поверхности конструкции, для незащищенных стальных конструкций  $s_0 = 0,74$ .

Для теплотехнического расчета в программном комплексе ANSYS mechanical были построены модели элементов фермы (рис. 5).

## Результаты и обсуждение

Результаты численного моделирования температурного режима пожара в помещении складского здания представлены на рис. 6.

Полученные при моделировании температурные режимы таких пожарных нагрузок, как кабели и провода, индустриальное масло, этиловый спирт, были выше максимальных значений температур «стандартного» температурного режима. Однако значения максимальных температур, определенные по результатам численных экспериментов для остальных пожарных нагрузок, приведенных выше, оказались ниже, чем при «стандартном» температурном режиме.

Результаты теплотехнических расчетов приведены в табл. 2 и на рис. 7.

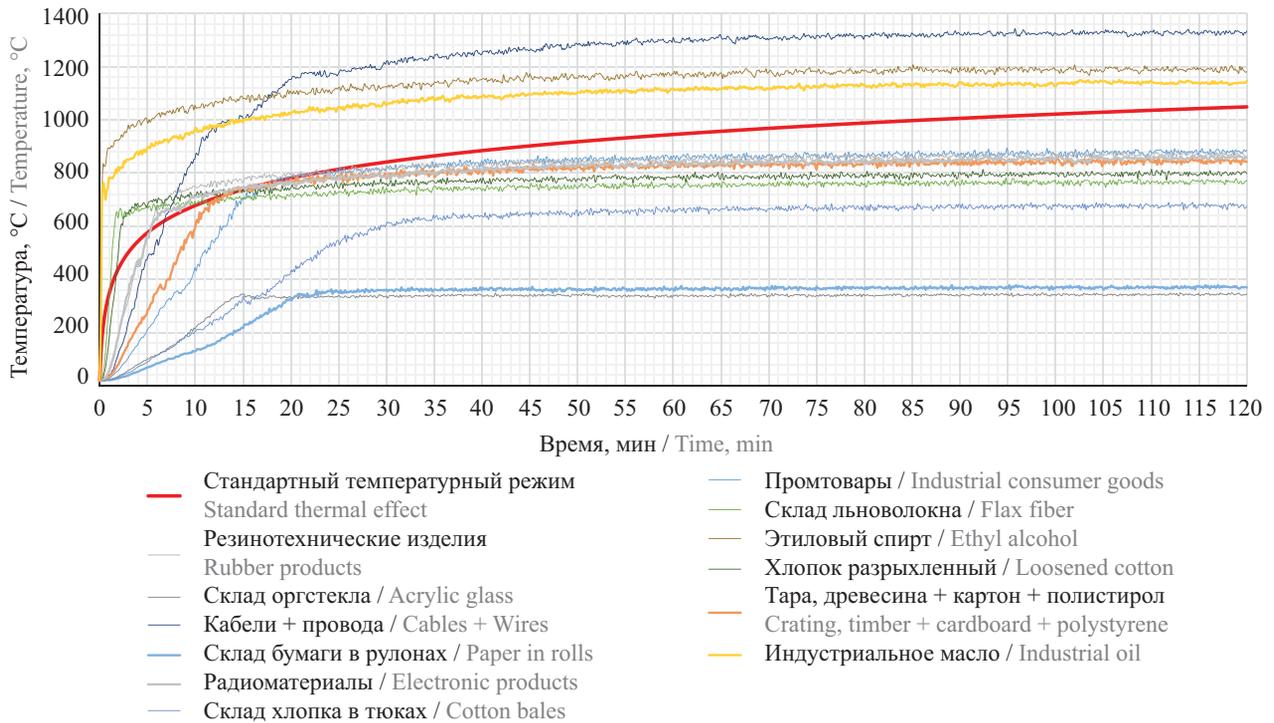


Рис. 6. Результаты численного моделирования «стандартного» температурного режима при среднеобъемной температуре на высоте 4,7...6,5 м

Fig. 6. Standard temperature regime and average volume temperature at an altitude of 4.7–6.5 m

Таблица 2. Результаты теплотехнического расчета

Table 2. The results of the heat engineering calculation

Размеры конструкции Construction dimensions	Температура прогрева, °C Temperature, °C	Время прогрева конструкции, мин Heating time of the structure, min												
		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13
□ 160×160×5	400	6,6	13,6	7,2	4,6	—	1,7	8,2	5,0	—	11,1	7,4	2,3	24,1
□ 140×140×5		6,6	13,6	7,2	4,6	—	1,7	8,2	5,0	—	11,1	7,4	2,3	24,1
□ 100×100×5		6,5	13,5	7,1	4,5	—	1,7	8,1	4,9	—	11,0	7,3	2,2	24,0
□ 160×160×5	450	7,4	14,3	7,7	5,2	—	1,9	8,6	5,6	—	11,7	8,1	2,6	25,8
□ 140×140×5		7,4	14,3	7,7	5,2	—	1,9	8,6	5,6	—	11,7	8,1	2,6	25,8
□ 100×100×5		7,4	14,3	7,7	5,2	—	1,9	8,6	5,5	—	11,7	8,0	2,5	25,7
□ 160×160×5	500	8,4	15,0	8,2	6,0	—	2,2	9,0	6,2	—	12,4	8,9	2,9	27,9
□ 140×140×5		8,4	15,0	8,2	6,0	—	2,1	9,0	6,2	—	12,4	8,9	2,9	27,8
□ 100×100×5		8,3	15,0	8,2	6,0	—	2,1	9,0	6,2	—	12,4	8,8	2,9	27,7
□ 160×160×5	550	9,5	15,8	8,9	7,0	—	2,4	9,5	7,1	—	13,2	9,8	3,3	30,3
□ 140×140×5		9,5	15,8	8,9	7,0	—	2,4	9,5	7,1	—	13,2	9,8	3,2	30,3
□ 100×100×5		9,5	15,7	8,9	6,9	—	2,4	9,4	7,0	—	13,1	9,7	3,2	30,2
□ 160×160×5	600	10,9	16,7	9,7	8,4	—	2,7	9,9	8,1	—	14,1	10,8	3,7	34,0
□ 140×140×5		10,9	16,7	9,7	8,3	—	2,7	9,9	8,1	—	14,1	10,8	3,6	34,0
□ 100×100×5		10,8	16,7	9,7	8,2	—	2,6	9,9	8,1	—	14,0	10,7	3,6	33,9

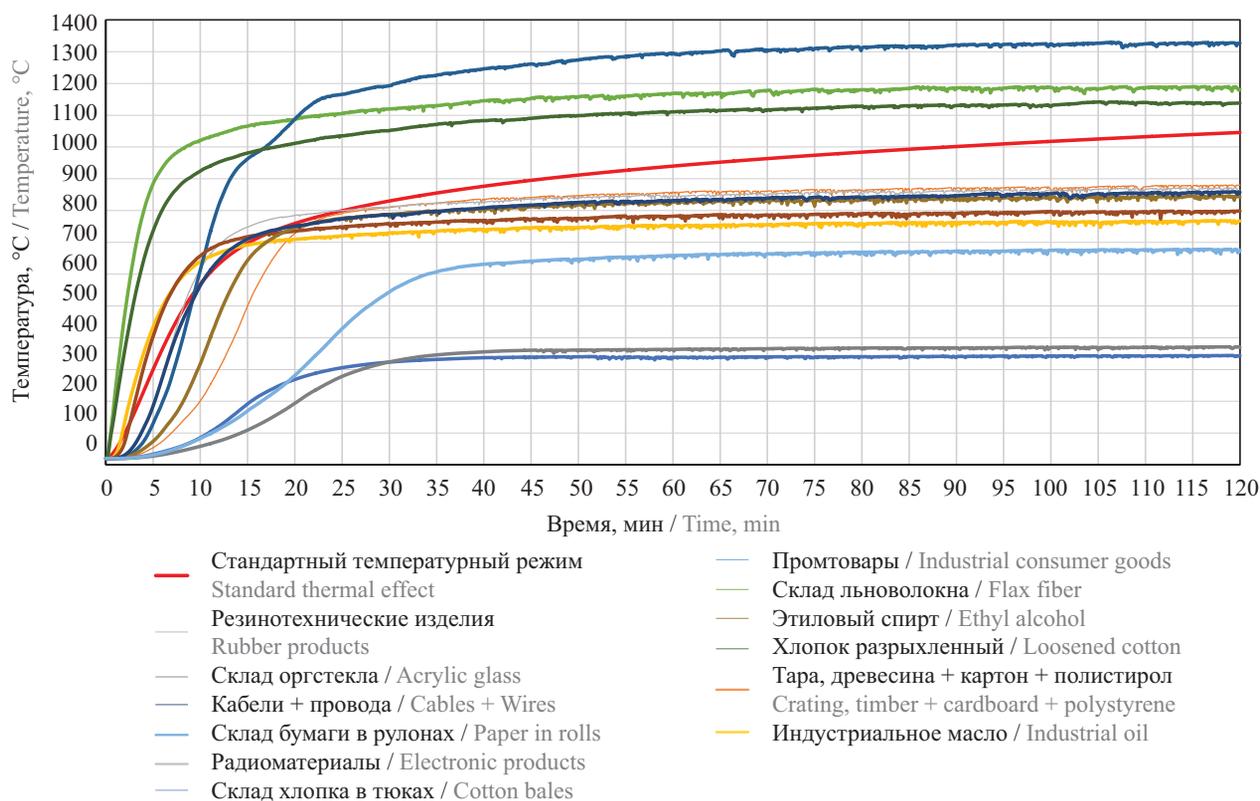
Размеры конструкции Construction dimensions	Температура прогрева, °C Temperature, °C	Время прогрева конструкции, мин Heating time of the structure, min												
		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13
□ 160×160×5	650	12,7	17,7	10,7	10,7	—	3,0	10,3	9,7	—	15,2	12,2	4,1	52,0
□ 140×140×5		12,7	17,7	10,7	10,6	—	3,0	10,3	9,7	—	15,2	12,2	4,1	52,0
□ 100×100×5		12,6	17,7	10,7	10,5	—	2,9	10,3	9,6	—	15,1	12,1	4,0	52,0
□ 160×160×5	700	15,2	19,0	12,3	16,7	—	3,3	10,8	12,6	—	17,0	14,4	4,6	—
□ 140×140×5		15,2	19,0	12,2	16,7	—	3,3	10,8	12,6	—	17,0	14,3	4,6	—
□ 100×100×5		15,1	19,0	12,2	16,7	—	3,2	10,8	12,5	—	16,9	14,3	4,5	—

Примечания. \* Позиции режимов и пожарных нагрузок: 1 — «стандартный» температурный режим; 2 — промтовары; 3 — резинотехнические изделия; 4 — склад льноволокна; 5 — склад оргстекла; 6 — этиловый спирт; 7 — кабели и провода; 8 — хлопок разрыхленный; 9 — склад бумаги в рулонах; 10 — тара (древесина и картон); 11 — радиоматериалы; 12 — промышленное масло; 13 — склад хлопка в тюках.

\*\* Знак «—» в таблице означает, что указанная в таблице температура за время расчета не достигнута.

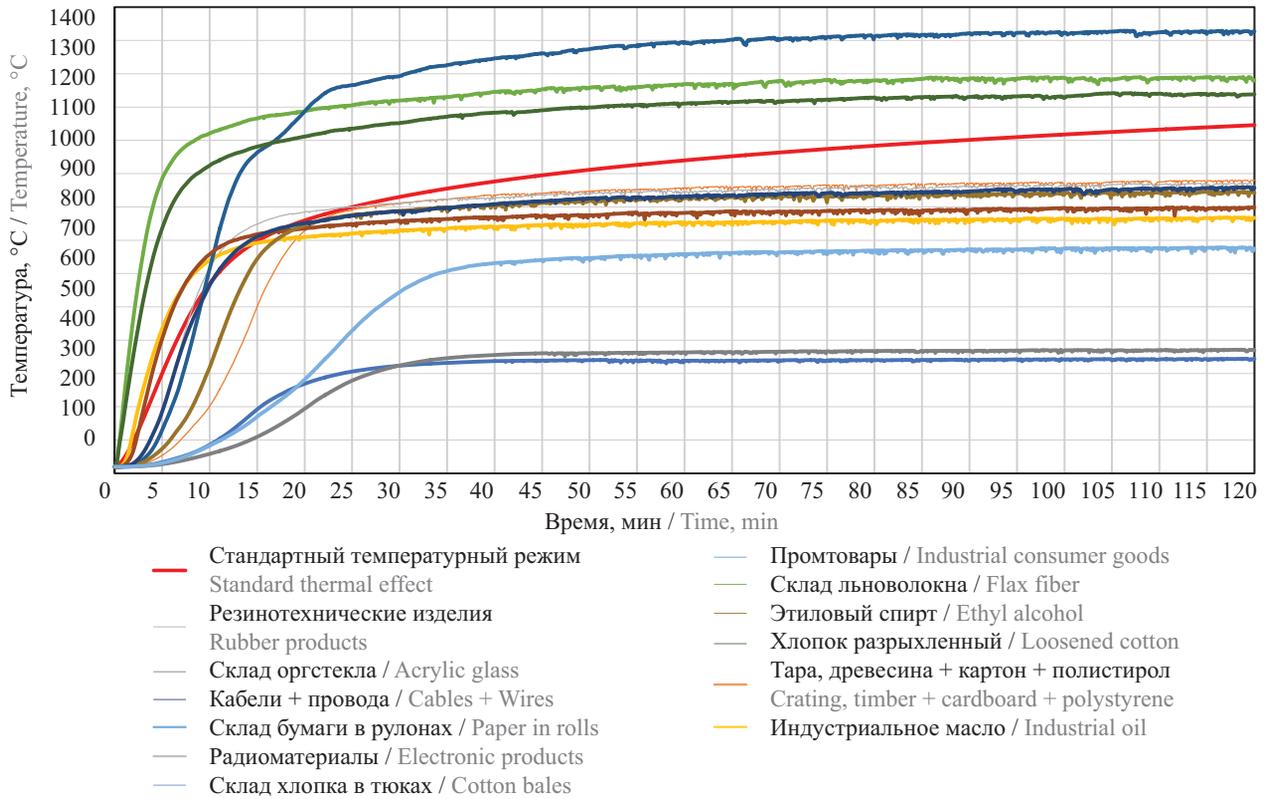
Note. \* Items in the table: 1 — Standard temperature conditions; 2 — industrial Goods; 3 — Rubber products; 4 — flax fiber Warehouse; 5 — plexiglass Warehouse; 6 — Ethyl alcohol; 7 — Cables+wires; 8 — loosened Cotton; 9 — paper Warehouse in rolls; 10 — packaging (wood+cardboard); 11 — radio materials; 12 — Industrial oil; 13 — cotton Warehouse in bales.

\*\* The “—” sign in the table means that the specified temperature in the table does not occur during the calculation.

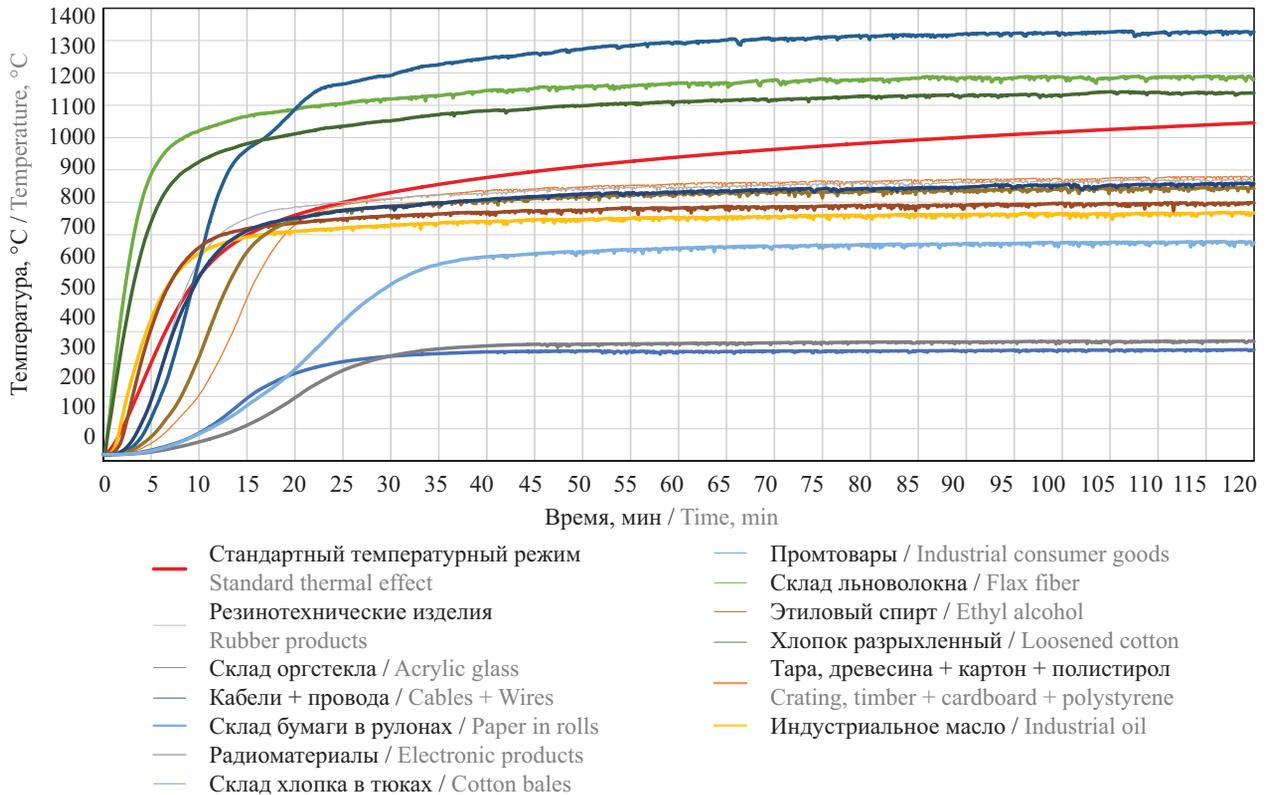


a

Рис. 7. Кривые прогрева прямоугольных труб размером 160×160×5 мм (a) в условиях различного теплового воздействия  
Fig. 7. Heating curves of a rectangular pipes with a size of 160×160×5 mm (a) under different temperature conditions



б



в

Рис. 7. Кривые прогрева прямоугольных труб размером 140×140×5 мм (б) и 100×100×5 мм (в) в условиях различного теплового воздействия

Fig. 7. Heating curves of a rectangular pipes with a size of 140×140×5 mm (b) and 100×100×5 mm (c) under different temperature conditions

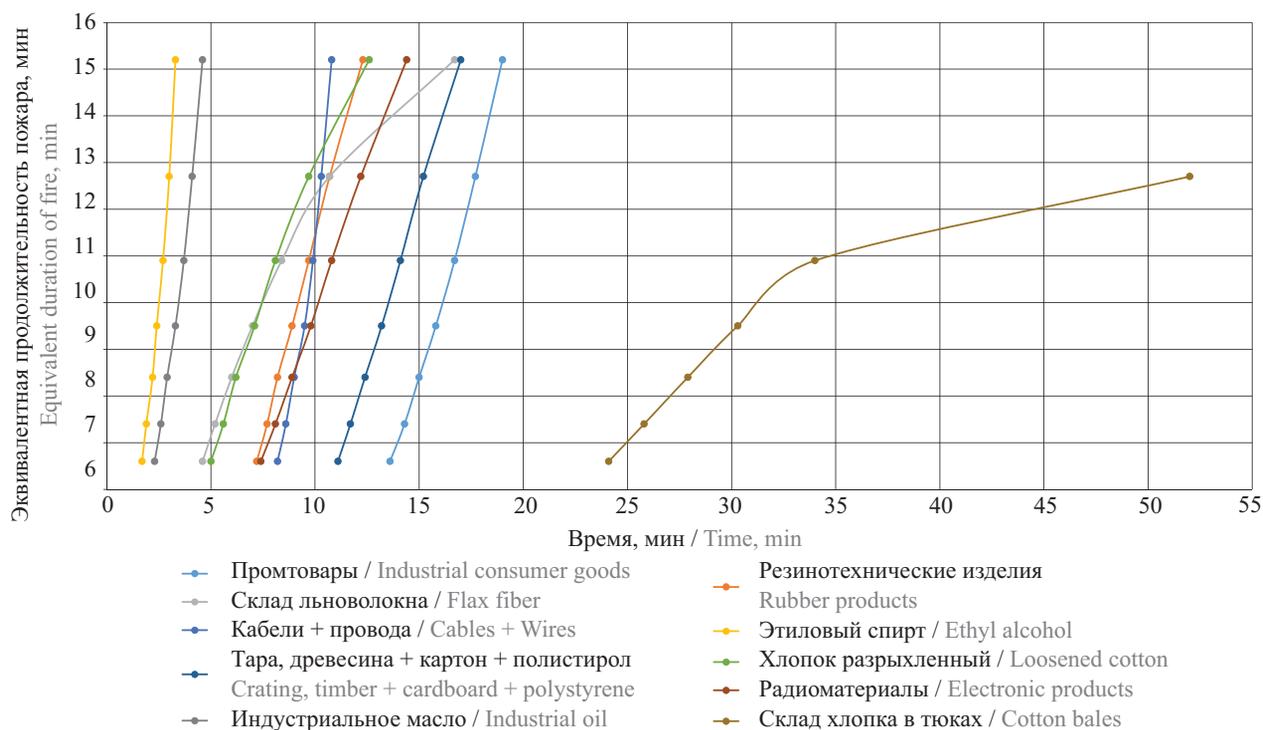


Рис. 8. Зависимость эквивалентной продолжительности пожара от вида пожарной нагрузки

Fig. 8. Dependence of the equivalent duration of the fire on the type of fire load

Результаты численных экспериментов показывают, что время прогрева конструкций фермы до 400...700 °С для рассматриваемых пожарных нагрузок существенно различается и в некоторых случаях ниже, чем при «стандартном» температурном режиме. На рис. 8 показаны зависимости эквивалентной продолжительности пожара от пожарной нагрузки.

Из рис. 8 видно, что эквивалентная продолжительность пожара для таких нагрузок, как склад льноволокна, этиловый спирт, хлопок разрыхленный, промышленное масло, резинотехнические изделия, выше продолжительности реального пожара, что указывает на недооценку теплового воздействия реальных пожаров на стальные конструкции покрытия складских зданий в расчетах для «стандартного» температурного режима. Потеря несущей способности фермы покрытия при наиболее критичном «реальном» температурном режиме пожара, полученном по результатам моделирования, наступает на 2-й и 4-й минутах, для «стандартного» температурного режима — на 6-й и 15-й минутах для критических температур 400 и 700 °С соответственно. Приведенные результаты численных экспериментов показали, что применение показателей одного «стандартного» температурного режима при проектировании складских зданий приводит к изначальному занижению фактических пределов огнестойкости несущих конструкций покрытия.

Полученные выше результаты оценки эквивалентной продолжительности пожара могут быть применены при определении требуемых пределов огнестойкости стальных конструкций покрытия складских зданий, которые могут быть рассчитаны по формуле (4) [20, 21]:

$$P_{tr} = K_0 t_{эkv}^2, \quad (4)$$

где  $P_{tr}$  — требуемый предел огнестойкости;  
 $K_0$  — коэффициент огнестойкости;  
 $t_{эkv}$  — эквивалентная продолжительность пожара.

Согласно требованиям п. 5.4.3 СП 2.13130.2012, допускается применять незащищенные стальные конструкции покрытия независимо от их фактического предела огнестойкости, за исключением случаев, когда предел огнестойкости хотя бы одного из элементов несущих конструкций покрытия по результатам испытаний составляет менее R8. Из приведенных выше расчетов следует, что в случае применения «стандартного» температурного режима для рассматриваемой фермы покрытия при критической температуре 500 °С и выше требования п. 5.4.3 СП 2.13130.2012 соблюдаются, и огнезащитная обработка конструкции не требуется. В случае же оценки огнестойкости по полученному в результате моделирования наиболее критичному «реальному» температурному режиму пожара дан-

ное требование не соблюдается, и требуется огнезащитная обработка. При этом следует отметить, что разработка мероприятий по огнезащите стальных конструкций с применением вспучивающихся покрытий в условиях воздействия реальных пожаров связана с определенными трудностями, так как их огнезащитная эффективность зависит от температурного режима [21, 22].

### Заключение

Анализ пожаров, произошедших в складских зданиях с 2010 по 2019 гг., показал, что во многих зданиях II–V степеней огнестойкости еще до приезда пожарных подразделений происходит обрушение покрытия на значительной площади, а сами пожары сопровождаются гибелью и травмированием людей, значительным материальным ущербом. Такая ситуация сложилась из-за низкой огнестойкости несущих стальных конструкций покрытия, которые, согласно нормативным требованиям, допускается применять без огнезащиты в случае, если к ним применяются требования по огнестойкости в течение 15 мин и собственный предел огнестойкости конструкции составляет не менее 8 мин.

В ходе проведения численных экспериментов в программном комплексе FDS установлено, что

тепловое воздействие, оказываемое на несущие конструкции покрытия при «стандартном» температурном режиме, для трех (кабели и провода, индустриальное масло, этиловый спирт) из 12 рассмотренных пожарных нагрузок оказалось ниже, что указывает на недооценку теплового воздействия.

Результаты моделирования прогрева конструкций в программном комплексе ANSYS mechanical показали, что время прогрева фермы покрытия до 400...700 °С для указанных пожарных нагрузок оказалось меньше времени, полученного по результатам прогрева при «стандартном» температурном режиме, что указывает на изначальное занижение фактической огнестойкости стальных конструкций покрытия при проектировании складских зданий.

Из полученных результатов исследования можно сделать вывод о том, что проводимая при проектировании оценка соответствия пределов огнестойкости конструкций покрытия значениям, требуемым Федеральным законом № 123-ФЗ, при «стандартном» температурном режиме без учета особенности пожарной нагрузки в ряде случаев приводит к недооценке теплового воздействия и занижению фактической огнестойкости, что отрицательно сказывается на пожарной безопасности складских зданий.

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Якубсон В.М. Перспективы металла как строительного материала // Инженерно-строительный журнал. 2015. № 2 (54). С. 4–5. DOI: 10.5862/MCE.54.1
2. Яковлев А.И. Расчет огнестойкости строительных конструкций. М. : Стройиздат, 1988. 143 с.
3. Ройтман В.М. Инженерные решения по оценке огнестойкости проектируемых и реконструируемых зданий. М. : Пожнаука, 2001. 382 с.
4. Еремина Т.Ю., Минайлов Д.А. Гармонизация российских и международных нормативных документов по оценке огнестойкости строительных конструкций (основные подходы к проведению огневых испытаний) // Пожарная безопасность. 2014. № 2. С. 151–155.
5. Roitman V.M. Consideration of real fire condition while calculating the fire resistance of building structures on the basis of the kinetic approach // Fire Safety Journal. 1990. Vol. 16. Pp. 433–442.
6. Phan L.T., McAllister T.P., Gross J.L., Hurley M.J. Best practice guidelines for structural fire resistance design of concrete and steel buildings. NIST Technical Note 1681. Gaithersburg, Maryland : NIST, 2010. 200 p. DOI: 10.6028/nist.tn.1681
7. Garlock M., Kruppa J., Li G.-Q., Zhao B. White paper on fire behavior of steel structures. NIST GCR 15-984. Gaithersburg, Maryland : NIST, 2014. 20 p. DOI: 10.6028/nist.gcr.15-984
8. Kotsovinos P. Analysis of the structural response of tall buildings under multifloor and travelling fires. Edinburgh : The University of Edinburgh, 2013. 240 p.
9. Kowalski R. The use of Eurocode model of reinforcing steel behavior at high temperature for calculation of bars elongation in RC elements subjected to fire // Procedia Engineering. 2017. Vol. 193. Pp. 27–34. DOI: 10.1016/j.proeng.2017.06.182
10. Razdolsky L. Structural fire loads: theory and principles. New York : McGraw-Hill Education, 2012. 448 p.
11. Du Y. A new temperature-time curve for fire-resistance analysis of structures // Fire Safety Journal. 2012. Vol. 54. Pp. 113–120. DOI: 10.1016/j.firesaf.2012.07.004
12. Mouritz A.P., Feih S., Kandare E., Gibson A.G. Thermal-mechanical modelling of laminates with fire protection coating // Composites Part B: Engineering. 2013. Vol. 48. Pp. 68–78. DOI: 10.1016/j.compositesb.2012.12.001
13. Outinen J., Samec J., Sokol Z. Research on fire protection methods and a case study «Futurum» // Procedia Engineering. 2012. Vol. 40. Pp. 339–344. DOI: 10.1016/j.proeng.2012.07.105

14. Гогоберидзе Н.В., Благородова Н.В. К вопросу автоматизации системы определения предела огнестойкости строительных конструкций // Инженерный вестник Дона. 2012. № 4–1 (22). С. 110.
15. Пузач С.В. Математическое моделирование газодинамики и теплообмена при решении задач пожаровзрывобезопасности. М. : Академия ГПС МЧС России, 2002. 149 с.
16. Фисун В.А. Номенклатура базовых зданий комплектной поставки из легких металлических конструкций : монография. М. : МИИТ, 2009. 143 с.
17. Кошмаров Ю.А. Прогнозирование опасных факторов пожара в помещении: учеб. пособие. М. : Академия ГПС МВД России, 2000. 118 с.
18. Абашкин А.А., Карпов А.В., Ушаков Д.В., Фомин М.В., Гилетич А.Н., Комков П.М., Самошин Д.А. Пособие по применению «Методики определения расчетных величин пожарного риска в зданиях, сооружениях и строениях различных классов функциональной пожарной опасности». М. : ВНИИПО, 2014. 226 с.
19. Голованов В.И., Павлов В.В., Пехотиков А.В. Инженерный метод расчета огнестойкости стальных конструкций с огнезащитой из минераловатных плит «ROCKWOOL CONLIT» // Пожарная безопасность. 2006. № 4. С. 78–85.
20. Иванов В.Н. Комплексный подход к определению требуемых пределов огнестойкости высотных жилых зданий // Пожары и чрезвычайные ситуации: предотвращение, ликвидация. 2018. № 1. С. 28–38. DOI: 10.25257/FE.2018.1.28-38.
21. Korolchenko D., Eremina T., Minailov D. New method for quality control of fire protective coatings // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. 2019. Vol. 471. Issue 11. DOI: 10.1088/1757-899X/471/11/112016
22. Lucherini A., Giuliani L., Jomaas G. Experimental study of the performance of intumescent coatings exposed to standard and non-standard fire conditions // Fire Safety Journal. 2018. Vol. 95. Pp. 42–50. DOI: 10.1016/j.firesaf.2017.10.004

## REFERENCES

1. Yakubson V.M. Prospects of metal as a construction material. *Magazine of Civil Engineering*. 2015; 2(54):4-5. DOI: 10.5862/MCE.54.1 (rus.).
2. Yakovlev A.I. *Calculation of fire resistance of building structures*. Moscow, Stroyizdat, 1988; 143. (rus.).
3. Roitman V.M. Engineering decision of fire resistance projected and reconstructed buildings. Moscow, Pozhnauka, 2001; 382. (rus.).
4. Eremina T.Y., Minaylov D.A. Harmonization of the Russian and international normative documents on assessment of fire resistance of structures (key approaches to carrying out fire tests). *Fire Safety*. 2014; 2:151-155. (rus.).
5. Roitman V.M. Consideration of real fire condition while calculating the fire resistance of building structures on the basis of the kinetic approach. *Fire Safety Journal*. 1990; 16:433-442.
6. Phan L.T., McAllister T.P., Gross J.L., Hurley M.J. *Best Practice Guidelines for Structural Fire Resistance Design of Concrete and Steel Buildings. NIST Technical Note 1681*. Gaithersburg, Maryland, NIST, 2010; 200. DOI: 10.6028/nist.tn.1681
7. Garlock M., Kruppa J., Li G.-Q., Zhao B. *White Paper on Fire Behavior of Steel Structures. NIST GCR 15-984*. Gaithersburg, Maryland, NIST, 2014; 20. DOI: 10.6028/nist.gcr.15-984
8. Kotsovinos P. *Analysis of the structural response of tall buildings under multifloor and travelling fires*. Edinburgh, The University of Edinburgh, 2013; 240.
9. Kowalski R. The use of Eurocode model of reinforcing steel behavior at high temperature for calculation of bars elongation in RC elements subjected to fire. *Procedia Engineering*. 2017; 193:27-34. DOI: 10.1016/j.proeng.2017.06.182
10. Razzdolsky L. *Structural Fire Loads: Theory and Principles*. New York, McGraw-Hill Education, 2012; 448.
11. Du Y. A new temperature-time curve for fire-resistance analysis of structures. *Fire Safety Journal*. 2012; 54:113-120. DOI: 10.1016/j.firesaf.2012.07.004
12. Mouritz A.P., Feih S., Kandare E., Gibson A.G. Thermal–mechanical modelling of laminates with fire protection coating. *Composites Part B: Engineering*. 2013; 48:68-78. DOI: 10.1016/j.compositesb.2012.12.001
13. Outinen J., Samec J., Sokol Z. Research on fire protection methods and a case study “Futurum”. *Procedia Engineering*. 2012; 40:339-344. DOI: 10.1016/j.proeng.2012.07.105
14. Gogoberidze N.V., Bлагородова N.V. On the automation system for determining the fire resistance of building structures. *Engineering Journal of Don*. 2012; 4-1(22):110. (rus.).
15. Puzach S.V. *Mathematical modeling of gas dynamics and heat and mass transfer in solving fire and explosion safety problems*. Moscow, Academy of State Fire Service of EMERCOM of Russia, 2002; 149. (rus.).
16. Fисун V.A. *Nomenclature of base buildings of complete delivery of light metal structures : monograph*. Moscow, MIIT, 2009; 143. (rus.).

17. Koshmarov Y.A. *Predicting indoor fire hazards: a training manual*. Moscow, Academy of State Fire Service of EMERCOM of Russia, 2000; 118. (rus.).
18. Abashkin A.A., Karpov A.V., Ushakov D.V., Fomin M.V., Giletich A.N., Komkov P.M., Samoshin D.A. *Manual on the application of "Methods for determining the calculated values of fire risk in buildings, structures and structures of various classes of functional fire hazard"*. Moscow, VNIPO, 2014; 226. (rus.).
19. Golovanov V.I., Pavlov V.V., Pekhotikov A.V. Engineering method of design of fire resistance of steel constructions protected by "ROCKWOOL CONLIT" mineral wool boards. *Fire Safety*. 2006; 4:78-85. (rus.).
20. Ivanov V.N. Complex approach to determining required fire-resistance of high-rise residential buildings. *Fire and emergencies: prevention, elimination*. 2018; 1:28-38. DOI: 10.25257/FE.2018.1.28-38 (rus.).
21. Korolchenko D., Eremina T., Minailov D. New method for quality control of fire protective coatings. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*. 2019; 471(11). DOI: 10.1088/1757-899X/471/11/112016
22. Lucherini A., Giuliani L., Jomaas G. Experimental study of the performance of intumescent coatings exposed to standard and non-standard fire conditions. *Fire Safety Journal*. 2018; 95:42-50. DOI: 10.1016/j.firesaf.2017.10.004

*Поступила 10.03.2020, после доработки 27.04.2020;*

*принята к публикации 07.05.2020*

*Received March 10, 2020; Received in revised form April 27, 2020;*

*Accepted May 7, 2020*

### Информация об авторе

**МИНАЙЛОВ Денис Александрович**, заместитель начальника, Судебно-экспертное учреждение Федеральной противопожарной службы «Испытательная пожарная лаборатория» по Калининградской области, г. Калининград, Российская Федерация; ORCID: 0000-0001-9811-3908; ResearcherID: AAI-2064-2020; Scopus Author ID: 57207307581; e-mail: minailov-denis@mail.ru

### Information about the author

**Denis A. MINAILOV**, Deputy Chief, Forensic Institutions Federal Fire Service "Fire testing laboratory" of Kaliningrad Region, Kaliningrad, Russian Federation; ORCID: 0000-0001-9811-3908; ResearcherID: AAI-2064-2020; Scopus Author ID: 57207307581; e-mail: minailov-denis@mail.ru

## Корректность компьютерной модели и наша жизнь

© В.В. Холщевников<sup>1,2,3</sup>✉, А.П. Парфененко<sup>2</sup>

- 1 Академия Государственной противопожарной службы МЧС России (129366, г. Москва, ул. Бориса Галушкина, 4)
- 2 Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет (129337, г. Москва, Ярославское шоссе, 26)
- 3 НИИ «Республиканский исследовательский научно-консультационный центр экспертизы» (123317, г. Москва, ул. Антонова-Овсеенко, 13, стр. 1)

### АННОТАЦИЯ

**Введение.** В последнее десятилетие в России создаются различные программные продукты, претендующие на роль компьютерного эквивалента нормативному документу «Методика определения расчетных величин пожарного риска в зданиях, сооружениях и строениях различных классов функциональной пожарной опасности» (далее — Методика). В некоторых из них приводится комплекс программ, полностью подменяющий все разделы этого документа; другие касаются только моделирования времени эвакуации людей и определения на этом основании величины вероятности эвакуации  $P_{эв}$ , значение которой при нефункционирующих системах активной противопожарной защиты ( $K = 0,8...0,9$ ) должно быть равно 0,999.

**Анализ результатов определения расчетного времени эвакуации в программно-вычислительных комплексах.** Эталонные данные, по которым можно проверить точность вычислений расчетного времени эвакуации  $t_p$ , не приводятся, а большинство покупателей этих комплексов не обладают для этого необходимыми навыками. Авторы и продавцы программно-вычислительных комплексов предоставляют покупателям демонстрационные версии программ, но отказываются раскрывать исходные данные, на которых они базируются. Такую скрытность они объясняют тем, что продаваемые программы содержат некие ноу-хау, являющиеся их авторской собственностью. Поэтому купля-продажа основывается фактически только на доверии покупателя к продавцу. Однако здравый смысл заставляет искать те элементы программы, которые нужно проверить в первую очередь, а также способы осуществления подобной проверки. Элементы, требующие первоочередной проверки, перечислены в техническом регламенте «О требованиях пожарной безопасности»: безопасность эвакуации, ее своевременность и беспрепятственность. В статье мотивированы эти критерии — приведены примеры трагических последствий их невыполнения.

На простейших примерах авторы демонстрируют, как провести такую проверку. Для этого проведен расчет времени эвакуации людского потока при последовательном изменении его плотности по программам «Фогард Рв», Fenix+, «Сигма ПБ», «Урбан». Вручную сделан расчет таких же ситуаций по упрощенной аналитической модели. В процентах вычислены отклонения значений  $\Delta t_p$ , полученных в результате работы компьютерных программ, от значений при ручном счете. Оценка этих отклонений, приведенная в таблицах и продемонстрированная на графиках, показывает, что авторы программно-вычислительных комплексов изменяют в своих расчетах предметную область (модель), использованную в Методике, т.е. искажают установленные в результате научного открытия закономерности связи между параметрами людских потоков.

**Выводы и предложения.** В итоге показано, что рассмотренные коммерческие программно-вычислительные комплексы значительно занижают расчетное время эвакуации людей, определяя его ниже времени достижения критических уровней воздействия опасными факторами пожара  $t_{нб}$ , т.е. создают иллюзию выполнения условия  $t_{эв} \leq t_{нб}$ . Данное обстоятельство позволяет заказчику этого программного продукта не выполнять дорогостоящие требования обеспечения пожарной безопасности объекта. Тем самым владельцы этих программно-вычислительных комплексов вводят в заблуждение граждан, находящихся в зданиях и сооружениях, относительно обеспечения безопасности их здоровья и жизни.

**Ключевые слова:** безопасность; пожар; эвакуация; людской поток; модель; компьютеризация; опасные факторы; программное обеспечение; предметная область; закономерность; сертификация; экспертиза

**Для цитирования:** Холщевников В.В., Парфененко А.П. Корректность компьютерной модели и наша жизнь // Пожаровзрывобезопасность/Fire and Explosion Safety. 2020. Т. 29. № 3. С. 66–94. DOI: 10.22227/PVB.2020.29.03.66-94

✉ Холщевников Валерий Васильевич, e-mail: reglament2004@mail.ru

## Correctness of the computer model and our life

© Valeriy V. Kholshchevnikov<sup>1,2,3</sup>✉, Aleksander P. Parfenenko<sup>2</sup>

- 1 State Fire Academy of Emercom of Russia (Borisa Galushkina St., 4, Moscow, 129366, Russian Federation)
- 2 National Research Moscow State University of Civil Engineering (Yaroslavskoye Shosse, 26, Moscow, 129337, Russian Federation)
- 3 Scientific Research Institute "Federal Research Centre for Projects Evaluation and Consulting Services" (Antonova-Ovseenko St., 13, Bldg. 1, Moscow, 123317, Russian Federation)

## ABSTRACT

**Introduction.** In the last decade, various software products have been created in Russia that claim to be a computer equivalent to the statutory document "Method of determining design values of fire risk in buildings, structures and constructions of different functional fire hazard classes". In some of them, the complex of the programs completely substituting all sections of this document is given; others concern only modelling of time of evacuation of people and determining, on this basis, the probability of evacuation  $P_{ev}$ , which value, at not functioning systems of active fire protection ( $K = 0.8-0.9$ ), shall be equal 0.999.

**Analysis of Results of Determining Estimated Time of Evacuation in Software and Computing Systems.** However, the reference data on which it is possible to check the accuracy of calculations of estimated time of evacuation  $t_e$  is not given, and the majority of buyers of these systems do not have enough skills for this purpose. Software and computing system salesmen provide demo versions of software to customers, but refuse to disclose the source data on which they are based. They explain this "secrecy" by the fact that the software sold contains a certain KNOW-HOW which is their copyright. Therefore, the purchase and sale is, in fact, based only on the trust of the buyer to the seller. But the universal thing "Try before you trust" makes you look for what to check first and how to do it. What to check first is listed in the technical regulations "On fire safety requirements": safety of evacuation, its promptness and unhindered access. The article is motivated by these criteria, examples of tragic consequences of their non-fulfillment are given.

The authors then show how to perform such a test through the simplest examples. For this purpose, calculation of time of evacuation of a human flow at consecutive change of its density under Fogard Rv programs is made, Sigma PB, Urban; the calculation of the same situations using a simplified analytical model is made "Manually". The deviations of  $t_p$  values, obtained by computer programs from the values in the manual computation are calculated in percents. The evaluation of these deviations, given in the tables and on the graphs, shows that the developers of software and computing systems change in their calculations the domain area (model) used in the Methodology, i.e. distort the patterns of connection between the parameters of human flows established as a result of scientific discovery.

**Conclusions and Proposals.** As a result it is shown that results of the considered commercial software and computing systems considerably underestimate estimated time of evacuation of people, defining it below time of achievement of critical levels of influence by hazards of fire  $t_{bs}$ , i.e. create the illusion of fulfilment of the condition:  $t_{e,i} \leq t_{bs}$ . This allows the customer of this software product *not to fulfill expensive requirements of fire safety of the facility*. Thus, the owners of these software and computing systems mislead the citizens who are in buildings and structures regarding the safety of their health and life.

**Keywords:** safety; fire; evacuation; human flow; model; computerization; hazards; software; domain area; pattern; certification; expertise

**For citation:** Kholshchevnikov V.V., Parfenenko A.P. Correctness of the computer model and our life. *Pozharovzryvobezopasnost/Fire and Explosion Safety*. 2020; 29(3):66-94. DOI: 10.22227/PVB.2020.29.03.66-94

✉ Valeriy Vasilyevich Kholshchevnikov, e-mail: reglament2004@mail.ru

## Введение

Противопожарное нормирование в России, определив условия соответствия объектов защиты требованиям пожарной безопасности (ст. 6 Федерального закона № 123-ФЗ<sup>1</sup>) и введя в качестве нормативного документа Методику определения расчетных величин пожарного риска в зданиях, сооружениях и строениях различных классов функциональной пожарной опасности<sup>2</sup> (далее — Методика), резко активизировало использование математического моделирования движения людских потоков при помощи программно-вычислительных комплексов. Это объясняется тем, что расчетная величина индивидуального пожарного риска в решающей мере зависит от вероятности безопасной эвакуации людей  $P_{эв}$ .

<sup>1</sup> Технический регламент о требованиях пожарной безопасности : Федеральный закон от 22.07.2008 № 123-ФЗ (в ред. от 27.12.2018). URL: <http://docs.cntd.ru/document/902111644>

<sup>2</sup> Методика определения расчетных величин пожарного риска в зданиях, сооружениях и строениях различных классов функциональной пожарной опасности : утверждена приказом МЧС России от 30.06.2009 № 382.

И если 15–20 лет назад описание программ моделирования людских потоков на ЭВМ можно было обнаружить в основном в зарубежных публикациях [1–5], то в последнее десятилетие, наряду с развитием программ компьютерного моделирования людских потоков за рубежом [6, 7], стал активно формироваться отечественный рынок программно-вычислительных комплексов, предлагающих компьютерные программы для определения  $t_p$ : «Фогард Рв»<sup>3</sup>, Fenix<sup>4</sup>, «Сигма ПБ»<sup>5</sup>, «Урбан»<sup>6</sup>. Программируя вычисление этой величины, разработчики указанных комплексов могли изначально избежать ошибок начального этапа становления зарубежного моделирования, которые состояли в подмене людского потока движением потоков другой природы: металлических частиц в электромагнитном поле, гидравлических аналогий [1, 2], потоков вызовов в теории массового обслуживания, потока сыпучих сред и т.п. [8–10]. Но сегодня неизвестно, расчеты

<sup>3</sup> Фогард. Пожарные программы On-Line. URL: [www.fogard.ru](http://www.fogard.ru)

<sup>4</sup> MST. В сфере пожарной безопасности. URL: [www.mst.ru](http://www.mst.ru)

<sup>5</sup> Sigma. Програмное обеспечение. URL: [www.3ksigma.ru](http://www.3ksigma.ru)

<sup>6</sup> URBAN. URL: [www.urbanpo.ru](http://www.urbanpo.ru)

каких предметных моделей реализуют предлагаемые коммерческие вычислительные комплексы, хотя они и используют названия моделей, приведенных в Методике.

Ответ на этот вопрос не удастся получить и от авторов коммерческих программно-вычислительных комплексов — они мотивируют это коммерческой тайной (поскольку продаваемый ими программный продукт является их интеллектуальной собственностью и объектом авторского права). Но каждый приобретатель такого комплекса имеет право знать, что он покупает под видом программно-вычислительного комплекса, и не только из-за его значительной стоимости (табл. 1).

Это право приобретателя определяется и тем, что от корректности нормирования характеристик людского потока, определяющих расчетное время эвакуации  $t_p$ , зависит и его собственная безопасность в соответствии с условием:

$$t_{нз} + t_p \leq t_{нб}, \quad (1)$$

где  $t_{нб}$  — момент образования критического для жизни человека уровня воздействия опасного фактора пожара (ОФП), до достижения которого ему необходимо покинуть рассматриваемый участок пути.

Если расчетное значение  $t_p$  окажется ниже вероятного для потока основного функционального состава, то реального человека ждет смерть, поскольку он не успеет эвакуироваться до момента  $t_{нб}$ , т.е. в реальности  $t_{нз} + t_p \geq t_{нб}$ . Поэтому получается, что компьютерная программа определяет вашу жизнь!

В связи с этим необходимо рассмотреть следующие вопросы:

- представить, как обеспечивалась безопасность людского потока при отсутствии вычислительных возможностей компьютера;
- выяснить, как осуществляется валидация математических моделей, используемых в нормировании, на соответствие социальному явлению — реальному потоку людей;

- оценить влияние пропускной способности эвакуационного пути, моделируемого в программно-вычислительных комплексах, на безопасность эвакуации людей и величину  $t_p$ ;
- верифицировать зависимости между параметрами людского потока, используемые в коммерческих программно-вычислительных комплексах;
- определить, что является интеллектуальной собственностью разработчика в программно-вычислительном комплексе;
- предложить программу действий.

#### Как обеспечивалась безопасность людей, когда не было компьютера

Всплеску компьютерных расчетов движения людских потоков предшествовал достаточно продолжительный этап освоения представителями научной школы Теория людских потоков [11], возможностей применения ЭВМ для выполнения таких расчетов. До появления ЭВМ расчет велся графоаналитическим методом [12, 13]. «Однако расчет графоаналитическим методом, хотя и достаточно элементарен по своему существу, но трудоемок» [14, с. 167]. Поэтому при появлении ЭВМ первого поколения («Урал-2») сразу же была сделана попытка их использования для автоматизации расчетов людских потоков [15].

В чем же заключаются элементарность и трудоемкость графоаналитического метода расчета?

Элементарность метода состоит в простоте вычислительных операций, последовательно выполняемых в ходе его осуществления, и в простоте графической фиксации их результатов:

- количество людей  $N_i$ , занимающих  $i$ -й участок пути длиной  $l_i$  (расстояние между первым и последним человеком в потоке) и шириной потока  $\delta_i = b_i$  (ширина участка пути), определяет значение плотности потока на  $i$ -м участке, чел./м<sup>2</sup>:

$$D_i = N_i / l_i b_i; \quad (2)$$

**Таблица 1.** Пример стоимости, руб., коммерческого программно-вычислительного комплекса в зависимости от оплаченной продолжительности его использования

**Table 1.** An example of the cost in rubles of a commercial software and computing system, depending on the paid duration of its use

«Сигма ПБ» “Sigma PB”	1 день 1 day	1 месяц 1 month	3 месяца 3 months	6 месяцев 6 months	12 месяцев 12 months
для стандартных объектов for standard facilities	533	7330	18 630	30 030	53 000
для больших и очень больших объектов for big and very big facilities	533	9300	27 300	49 300	83 000

- по прилагаемой таблице (например, Приложение I в [13]) определяется соответствующее этому значению плотности людского потока значение скорости его движения  $V_i$ , м/мин, по данному участку;
- время движения, мин, по  $i$ -му участку пути рассчитывается просто:

$$t_i = l_i / V_i \quad (3)$$

Результат такой расчетной операции может быть отображен графически прямой линией в координатах «длина пути — время» (рис. 1).

Интенсивность движения людского потока на рассматриваемом участке пути определяется перемножением найденных величин, чел./м · мин:

$$q_i = V_i D_i \quad (4)$$

При переходе на последующий участок пути  $i + 1$  через сечение, в котором изменяется его ширина (с  $b_i$  на  $b_{i+1}$ ) или вид  $j$  (горизонтальный, лестница, проем), значение интенсивности движения людского потока  $q_{i+1}$  определяется по формуле [12, 13]:

$$q_{i+1} = V_i D_i b_i / b_{i+1} = q_i b_i / b_{i+1} \quad (5)$$

По таблице (например, в Приложении I в [13]) находятся значения плотности  $D_{i+1}$  и скорости  $V_{i+1}$ , соответствующие этому значению интенсивности движения. Затем, аналогично (2), рассчитывается время движения по участку  $i + 1$ , мин:

$$t_{i+1} = l_{i+1} / V_{i+1} \quad (6)$$

Выполнение этой расчетной операции опять графически фиксируется (см. рис. 1).

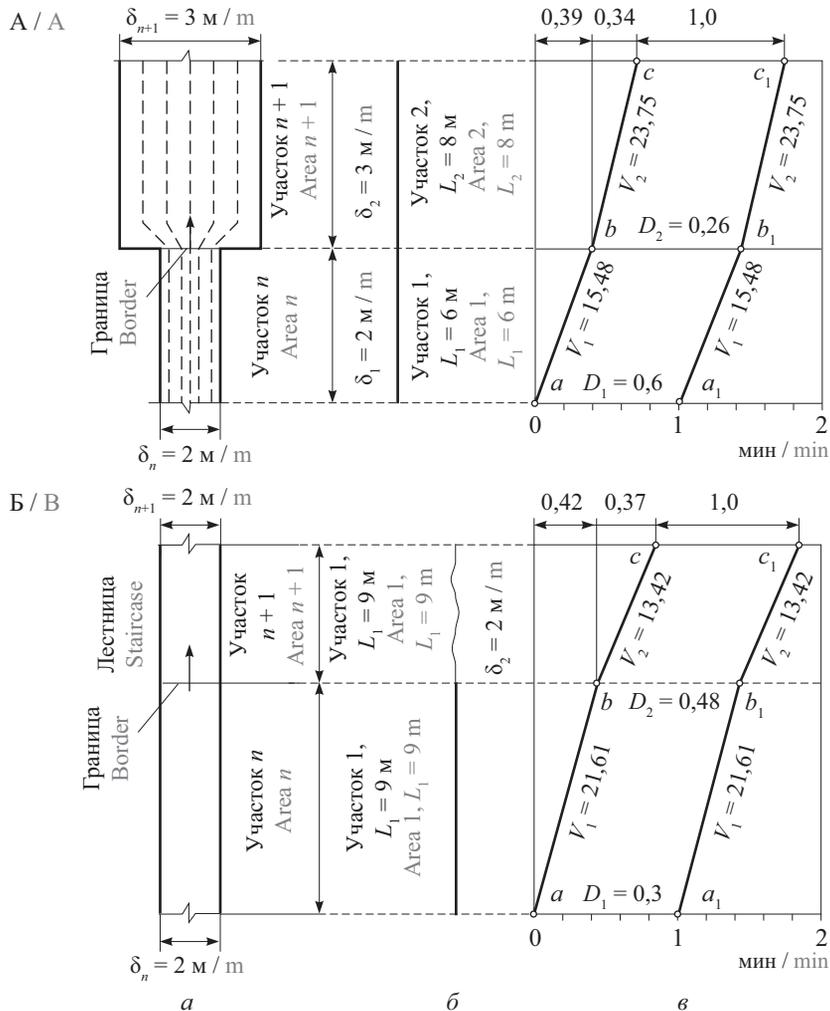


Рис. 1. Примеры графоаналитического метода расчета движения людского потока по смежным участкам эвакуационного пути: А — через границу смежных участков горизонтального пути, имеющих различную ширину; Б — по горизонтальному пути и лестнице; а — вид пути; б — схема пути; в — расчетный график [13, рис. 27, 28]

Fig. 1. Examples [13, Fig. 27, 28] of the graphical analytic method for calculating the human flow along the adjacent sections of the escape route: A — through the border of adjacent sections of horizontal track with different widths; B — horizontally and through staircase; a — type of route, b — evacuation map, c — design chart

Приведенные два примера наглядно демонстрируют простоту вычислительных операций и графического построения траектории кинематики, замыкающей границы потока, известные широкому кругу специалистов с техническим образованием из курса теоретической механики.

Однако даже эта простота не компенсирует утомительности множества действий, возникающих при расчетах одновременного движения людей в многочисленных секторах зрительских мест на трибунах крупных спортивно-зрелищных залов [15] или при эвакуации из высотных зданий [16]. Примером может служить графоаналитический расчет движения людского потока в продольном проходе зрелищного зала: на участках ограниченной длины (между выходами из проходов между рядами мест для зрителей), с характерным для него одновременным слиянием и переформированием потоков, образованием максимальных плотностей и задержек движения людей между рядами зрительских мест (рис. 2).

Необходимо подчеркнуть, что первые обращения исследователей людских потоков к ЭВМ были вызваны их стремлением именно **упростить вы-**

**числительные операции, не трогая предметной модели,** хотя они и вводили некоторые новые термины и определения в ее описание. Например, находим: «... введем понятие **масса**, понимая под ним площадь, занимаемую людьми ...» [15, с. 101].

Наиболее полное словесное описание образной модели «Людской поток» состоит в следующем. «Размещение людей в потоке (как по длине, так и по ширине) имеет всегда неравномерный и часто случайный характер. Расстояние между идущими людьми постоянно меняется, возникают местные уплотнения, которые затем рассасываются и возникают снова» [13, с. 29]. «Наблюдения показывают, что людской поток обычно имеет вытянутую сигарообразную форму. При этом головная и замыкающая части состоят из небольшого количества людей,двигающихся с большей или меньшей скоростью, чем основная масса людей в потоке» [13, с. 28]. «Ширина потока  $\delta$ , как правило, обуславливается свободной для движения шириной участка  $b$ , ограниченного ограждающими конструкциями. ... **Между ограждающими конструкциями и массой людей при движении всегда образуются зазоры  $\Delta b$ , соблюдаемые людьми из-за неизбежного раска-**

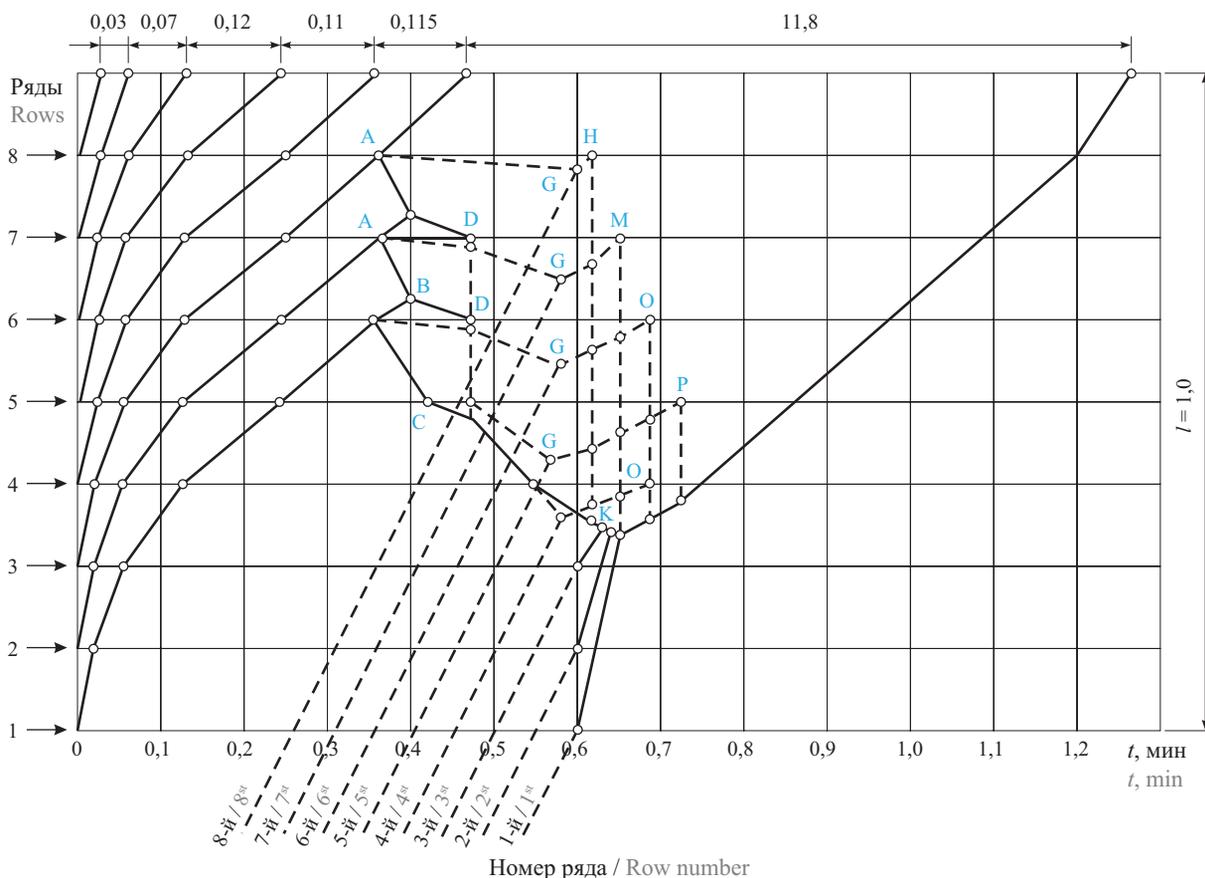


Рис. 2. Расчетный график движения людского потока в проходе зрелищного зала [13, рис. 51]

Fig. 2. Design chart of human flow in the passage of the audience hall [13, Fig. 51].

чивания при ходьбе и опасения задеть конструкцию или какую-нибудь выступающую ее деталь» [13, с. 29] (рис. 3).

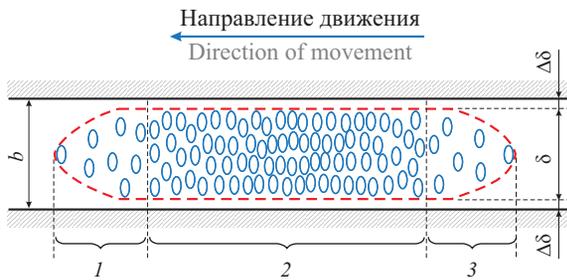


Рис. 3. Структура людского потока: 1 — головная часть; 2 — основная часть; 3 — замыкающая часть

Fig. 3. Human flow structure: 1 — head end; 2 — main end; 3 — closing end

В зависимости от полноты учета кинематических закономерностей возможно несколько моделей движения людского потока. Наиболее простой среди них является **упрощенная модель движения людского потока однородного состава**. При разработке этой модели считается, что, «поскольку количество людей, составляющих головную и замыкающую части, относительно невелико по сравнению с основной массой, ... зазоры  $\Delta\delta$  могут не учитываться», то «вполне **возможно показать поток в виде прямоугольника**» [13, с. 29] шириной  $b_i$  и длиной  $l_p$ , равной длине основной части потока. Графики на рис. 1 описывают кинематику этой модели людского потока, по ним видно, что это — **прямолинейное равномерное движение**. Очевидно, что такая модель — результат следования парадигме механического движения, которая господствовала среди специалистов того времени и в преподавании технических вузов, выпускниками которых были все исследователи людских потоков.

Графики на рис. 2 характеризуют движение людского потока по участкам сборного прохода, в который выходят люди из рядов зрительских мест в последовательные периоды времени. Сначала наблюдается равномерное движение, затем — равномерно ускоренное (переформирование потока на участке), равномерно замедленное (из-за роста плотности потока на участке и образования скоплений людей в проходах рядов зрительных мест) и под конец процесса, на участках выходов из рядов с третьего по восьмой, — стабилизировавшееся равномерное движение, сопровождающееся растеканием потока.

Для реализации расчетов движения людских потоков на ЭВМ разрабатывались аналитические выражения, результаты расчетов по которым сравнивались с результатами, полученными графоаналити-

ческим методом. Поэтому эти выражения получили название «приближенные формулы». В истории исследований людских потоков выделяются два вида таких формул [14, с. 184–190], по которым **«результаты расчета ... близки к результатам, полученным графоаналитическим методом» — с точностью до 3 %**, т.е. в пределах точности осуществления самих расчетов и графических построений.

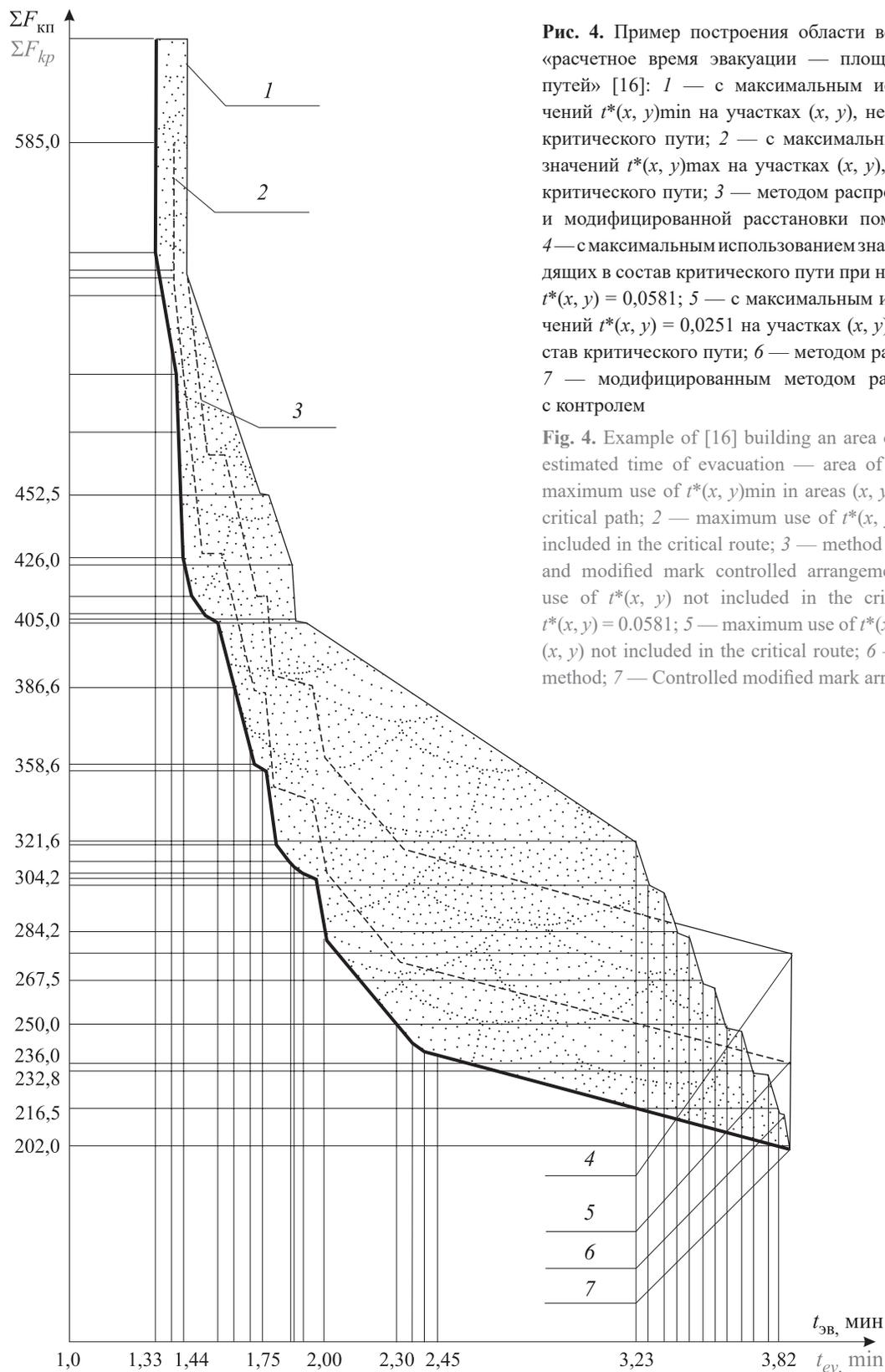
Первый из них был разработан в диссертационной работе Р.М. Дувидзона, защищенной в 1968 г. Резюме автора: «...разработанная методика (и созданная на ее основе программа) очень трудоемка, но это обстоятельство не является существенным при применении современной вычислительной техники» [15, с. 99]. Это — корректное резюме, однако, не затрагивало другой выявившейся проблемы применения ЭВМ — **сложности ввода в ЭВМ исходных данных**. (Напомним, что ввод исходных данных в «Урал-2» производился с магнитных носителей). По мере появления ЭВМ второго и третьего поколений программы для автоматизации расчетов движения людских потоков продолжали совершенствоваться [17, 18], но спустя и еще 20 лет исходные данные новой программы расчета людских потоков [19] приходилось вводить с перфокарт.

Второй вид формулы был разработан в диссертационной работе [16] при поиске способов модификации алгоритма построения кривой минимальной стоимости, используемого математической теорией потоков в сетях [20]. В процессе этого поиска выяснилось, что схемы эвакуационных путей и выходов, составляемые на основании топологии объемно-планировочных решений зданий, не содержат достаточной информации для проведения необходимых вариантов расчетов, а методология теории потоков в сетях не может учитывать влияния величины людского потока на увеличение ширины пути его движения. Поэтому в [16] **впервые была разработана методика составления расчетных схем эвакуации**. В расчетных схемах указывается число людей в каждом из источников людских потоков, расчетные размеры участков пути, направления эвакуации по ним и параметры людских потоков, образующихся на них. (Составление расчетных схем позже стало составной частью Методики определения расчетных величин пожарного риска в зданиях, сооружениях и строениях различных классов функциональной пожарной опасности).

Полученная же упрощенная формула, обсуждаемая во втором издании учебного пособия «Проектирование зданий с учетом организации движения людских потоков» [14, (7.15)], дает возможность, прежде всего, установить вариант кинематики процесса в рассматриваемой планировочной ситуации и затем определить  $t_p$  с учетом

количества слияний на рассматриваемом участке расчетной схемы. Использование этой формулы позволило разработать методику построения кри-

вой минимальной площади эвакуационных путей при заданной величине  $t_p$ , пример которой приведен на рис. 4 (нижняя кривая).



**Рис. 4.** Пример построения области возможных решений «расчетное время эвакуации — площадь эвакуационных путей» [16]: 1 — с максимальным использованием значений  $t^*(x, y)_{\min}$  на участках  $(x, y)$ , не входящих в состав критического пути; 2 — с максимальным использованием значений  $t^*(x, y)_{\max}$  на участках  $(x, y)$ , входящих в состав критического пути; 3 — методом распространения пометок и модифицированной расстановки пометок с контролем; 4 — с максимальным использованием значений  $t^*(x, y)$ , не входящих в состав критического пути при начальных значениях  $t^*(x, y) = 0,0581$ ; 5 — с максимальным использованием значений  $t^*(x, y) = 0,0251$  на участках  $(x, y)$ , не входящих в состав критического пути; 6 — методом расстановки пометок; 7 — модифицированным методом расстановки пометок с контролем

**Fig. 4.** Example of [16] building an area of possible solutions: estimated time of evacuation — area of escape routes: 1 — maximum use of  $t^*(x, y)_{\min}$  in areas  $(x, y)$  not included in the critical path; 2 — maximum use of  $t^*(x, y)_{\max}$  in areas  $(x, y)$  included in the critical route; 3 — method of marks distribution and modified mark controlled arrangement; 4 — maximum use of  $t^*(x, y)$  not included in the critical route at initial  $t^*(x, y) = 0.0581$ ; 5 — maximum use of  $t^*(x, y) = 0.0251$  in areas  $(x, y)$  not included in the critical route; 6 — mark arrangement method; 7 — Controlled modified mark arrangement method

Работа над методологией оптимизации структуры эвакуационных путей еще раз показала, что для **гносеологии людских потоков определяющее значение имеет установление закономерностей связи между их параметрами**. Используя аналогию с механическим движением в физике, можно сказать, что эти закономерности для людских потоков идентичны динамике механического движения, которая базируется на законах Ньютона. Общеизвестно, что на установление этих закономерностей потребовались сотни лет и преследование тех ученых, кто выступал против общепринятой парадигмы. Гносеологии людских потоков [21] на достижение теоретического уровня знаний потребовалось несколько меньше времени — всего лишь 50 лет. Столько лет прошло между публикацией первых результатов научных исследований процесса эвакуации людей, начатых институтом архитектуры Всероссийской академии художеств [22], и первой публикацией по современной методологии установления закономерностей связи между параметрами людских потоков [19].

Парадигма теоретического уровня знаний в области людских потоков опирается на две концепции: **людской поток — живая система, людской поток — стохастический процесс**. Это, казалось бы, очевидные истины. Но первая словесная формулировка модели: «**Людской поток представляет собой систему, элементами которой являются составляющие его люди**» [24, с. 98] и математическое описание связи между параметрами этой системы в виде случайной функции, использующее положения психофизики, впервые появились на страницах этой диссертационной работы в следующем виде:

$$\bar{V}_{D_j}^{\text{Э}} = \bar{V}_{0_j}^{\text{Э}} \left( 1 - a_j \ln \frac{D_i}{D_{0_j}} \right), \quad (7)$$

где  $\bar{V}_{D_j}^{\text{Э}}$  — вероятная величина скорости людей в эмоциональном состоянии (Э) при плотности потока  $D_i$  на участке  $j$ -го вида пути;

$\bar{V}_{0_j}^{\text{Э}}$  — случайная величина индивидуальной скорости свободного движения (при отсутствии влияния окружающих людей), зависящая от вида пути  $j$  и уровня эмоционального состояния (Э) людей;

$a_j$  — коэффициент, определяющий степень влияния плотности потока при движении по  $j$ -му виду пути;

$D_i$  — текущее значение плотности потока;

$D_{0_j}$  — пороговое значение плотности, по достижении которого плотность становится фактором, влияющим на скорость движения людей в потоке. (При значениях  $D_i < D_{0_j}$  плотность по-

тока не оказывает влияния на скорость движения людей — наблюдается свободное движение людей в потоке).

Следует отметить, что при вероятностном моделировании изменений скорости движения людей в потоке [25] для обеспечения точности расчетов становится важным установление такого соотношения между шагом моделирования и длиной элементарного участка его перемещения, которое не допускает неучтенного проскакивания людей за устанавливаемый шаг моделирования. Недостаточное внимание к этому аспекту моделирования движения людей при помощи ЭВМ может сказаться на его точности.

Важнейшим достижением теоретического уровня гносеологии людских потоков является **установление функциональной закономерности (значение теоретического корреляционного отношения  $\eta \geq 0,95$ ) реакции системы на плотность размещения элементов (людей) на различных видах пути и категорирование скорости их движения в зависимости от эмоционального и физического состояния**. Столь высокие значения  $\eta$  свидетельствуют о том, что предложенная модель в высокой степени отображает сущность социального явления, которое образно воспринимается как людской поток. Поэтому она и была признана международным сообществом научным открытием, т.е. диплом на открытие 24-S [25], выражаясь современными терминами, это — свидетельство **валидации** модели. (Валидация — процесс, позволяющий оценить, насколько близко модель представляет сущность реального мира).

Текст программ для расчетов по этой модели, написанный на языке Фортран, был опубликован в учебном пособии [19], поэтому мог свободно использоваться широким кругом заинтересованных лиц. Этот факт можно рассматривать как **верификацию предложенной модели людского потока** (подтверждение соответствия характеристик произведенной единицы продукции заданным эталонным требованиям).

Группа специалистов сформировавшейся научной школы теории людских потоков внесла нормирование соотношений (1)–(6) и закономерности изменений математических ожиданий случайных функций  $\bar{V}_{D_j}^{\text{Э}} = \varphi(D_i)$  и  $q_i = \phi(D_i)$  при движении повышенной активности в главу СНиП П-2-80 «Противопожарные нормы проектирования зданий и сооружений» (приложение, в котором зависимости  $\bar{V}_{D_j}^{\text{Э}} = \varphi(D_i)$  и  $q_i = \phi(D_i)$  приведены в табличной форме). Затем, используя эти закономерности, совместно с представителями ведущих научно-исследовательских институтов, были нормированы размеры эвакуационных путей и выходов в главах СНиП по проек-

тированию общественных и промышленных зданий, переиздаваемых каждые пять лет. Тем самым было положено начало созданию **новой методологии нормирования**, названной **гибким нормированием**, поскольку вместо единой нормы пропускной способности единицы ширины коммуникационного пути в нее вводится дифференцированная расчетная норма для различных видов пути и зданий различного назначения. Это следует из сопоставления СНиП II-2-80 с предшествующей редакцией главы СНиП II-A.5-70 «Противопожарные нормы проектирования зданий и сооружений»: «Суммарная ширина маршей лестничных клеток в зависимости от количества людей, находящихся на наиболее населенном этаже, кроме первого, а также ширина дверей, коридоров или проходов на путях эвакуации во всех этажах должна приниматься из расчета не менее 0,6 м на 100 человек» (п. 4.2).

Гибкость нормирования требовала и гибкости способов его применения в практике проектирования. Казалось бы, ЭВМ и создает такие возможности. Однако введение исходных данных в ЭВМ с перфокарт не только неудобно, но и сопровождается часто непреднамеренными ошибками, которые заставляют делать перерасчеты итоговых результатов. Поэтому при расчетах эвакуации из зданий крупнейших объектов Олимпиады 1980 г. в Москве, выполненных по поручению Госстроя СССР для предварительной оценки эффективности применения в нормировании установленных связей между параметрами людских потоков, расчеты выполнялись графоаналитическим методом. Эти сложности использования ЭВМ в проектной практике определили и многоэтапную методику гибкого нормирования, состоящую из документов трех уровней.

Документы первого (высшего) уровня, представленные главой СНиП II-2-80, содержали критерии безопасности людей при эвакуации, значения параметров движения людских потоков в аварийной ситуации на участках маршрута эвакуации, значения необходимого времени эвакуации для ее последовательных этапов (из помещения, с этажа, по вертикальным коммуникациям).

Документы второго уровня, представленные главами СНиП на проектирование отдельных видов зданий, содержали нормативные значения длины и ширины путей эвакуации для зданий различного назначения, установленные на основании нормативных требований документов первого уровня.

Документы третьего уровня, в качестве которых рассматривались методические пособия к существующим главам СНиП, должны были содержать изложение метода определения расчетного времени эвакуации и объяснять сферу корректного применения значений нормируемых величин.

В соответствие с этой структурой гибкого нормирования были быстро разработаны документы первых двух уровней. Постепенно разрабатывались и документы третьего уровня, например [26–31]. Однако обобщение результатов методики многоуровневого гибкого нормирования приводит к заключению, что она не в полной мере реализует исходную идею гибкого нормирования: «Система нормирования должна стимулировать своих потребителей к глубокому пониманию ее основ и требовать их ответственности за корректное использование этих основ на практике, поскольку при всей ширине нормированием возможных ситуаций оно не может охватить все. ... она не в полной мере реализует эти положения. Так, оперевшись, наконец, в явном виде на теорию в главе СНиП II-2-80. Противопожарные нормы проектирования зданий и сооружений, она вывела ее из активного использования, введя нормативы размеров эвакуационных путей и выходов в главах СНиП на проектирование отдельных видов зданий. Для большинства проектировщиков эти нормативы остаются, как и прежде, немотивированными требованиями. Вместо требований ответственности авторов проектов за решения по обеспечению безопасности людей в конкретных ситуациях ответственность фактически переложена на специалистов, обобщающих возможные проектные ситуации при разработке этих нормативов» [32, с. 85].

Основной причиной, определившей такое положение в нормировании, было отсутствие возможностей оперативного применения ЭВМ в проектной практике. Следует отметить, что подобное положение сложилось и при гибком нормировании величины  $t_{нб}$ , требовавшем оперативного решения системы дифференциальных уравнений моделей пожара. Их численное «решение можно выполнить только с помощью современных компьютеров (ЭВМ)» [33, с. 13].

Расчеты на ЭВМ свободного движения людей в потоке (SDLP — при  $D_i \leq D_{0j}$ ) и поточного движения (ADLP — при  $D_i > D_{0j}$ ) широко использовались при проведении специальных исследований [34–37], что требовало неординарной подготовки их исполнителей. Такой подготовки нельзя было ожидать от проектировщиков-архитекторов. Более того, неуверенность кураторов разработки СНиП II-2-80 в математической подготовке архитекторов и привела, как было сказано, к табличной форме нормирования закономерностей, выраженных логарифмической зависимостью (6).

Приведенные в главах СНиП нормы в последующем были заимствованы в ГОСТ 12.1.004–91<sup>7</sup> и в многочисленных сводах правил, которые появи-

<sup>7</sup> ГОСТ 12.1.004–91. Система стандартов безопасности труда (ССБТ). Пожарная безопасность. Общие требования.

лись в связи с принятием 27 декабря 2002 г. Федерального закона «О техническом регулировании» № 184-ФЗ. Технический регламент о требованиях пожарной безопасности следует рассматривать как развитие системы гибкого нормирования размеров эвакуационных путей и выходов, поскольку он, заставляя оценивать пожарный риск для каждого здания, персонализирует ответственность разработчиков каждого из них. При этом он сохранил новаторское требование предшествующего ему этапа противопожарного нормирования в СНиП 21-01-97\*<sup>8</sup> (п. 5. 28): дифференцировать значения параметров движения людей «с учетом их возраста, физического состояния, возможности пребывания в состоянии сна или бодрствования» в зданиях разных классов функциональной пожарной опасности.

Но эти прогрессивные принципы противопожарного нормирования остались бы благим пожеланием, если бы к тому времени не произошло коренного изменения возможностей ЭВМ — появились ЭВМ нового поколения, названные в СССР компьютерами. (В данном случае имеется в виду классификация поколений ЭВМ, использующая изменения элементной базы, на основании которой они построены: первое поколение — электронные лампы, второе — транзисторы, третье — микросхемы, четвертое — микропроцессоры. Первый массовый персональный компьютер был изготовлен фирмой IBM 12 августа 1981 г.).

Создание персонального компьютера привело, можно сказать, к компьютеризации всей страны. Как и электрификация, это был не мгновенный процесс. Но компьютер «добрался» и до архитектурно-строительного проектирования. Для моделирования людских потоков появление компьютера решило проблему предшествующих поколений — ввода информации в ЭВМ (с магнитной ленты [15], с перфокарт [19]) и расширило возможности операционной системы для автоматизации выполнения многочисленных расчетных операций. Поэтому с учетом новых возможностей компьютерных технологий представителями научной школы теории людских потоков была модернизирована программа поточного движения. В соответствии с системой сертификации, введенной Техническим регламентом в Федеральном законе № 184-ФЗ, корректность произведенных компьютерных новаций была подтверждена Госстандартом России в виде сертификации на соответствие [38].

Программа свободного движения людей в потоке, использованная при решении ряда градостроительных задач, была переработана в программу FMT1.0 [39] несколько позже. Такая задержка разработки

компьютерной программы свободного движения объясняется тем, что распределение людей по маршруту эвакуации при свободном движении могло быть получено аналитическим путем как функция случайной величины скорости людей в их источниках, имеющей нормальное распределение, а методы аналитического расчета этих распределений содержатся в вузовских учебниках по теории вероятностей.

Таким образом, участники школы теории людских потоков решили для себя многолетнюю проблему использования ЭВМ для моделирования людских потоков. Поэтому, когда представители Всероссийского ордена «Знак Почета» научно-исследовательского института противопожарной обороны МЧС России (ВНИИПО МЧС России) обратились к ним с предложением дать имеющиеся у них наработки для включения в разрабатываемый нормативный документ «Методика определения расчетных величин пожарного риска в зданиях, сооружениях и строениях различных классов функциональной пожарной опасности», они положительно откликнулись на него. Руководствуясь чувством долга, они продолжали коллективную работу по повышению безопасности людей при пожаре [40]. В Методику были переданы в том числе две модели людских потоков, уже имевшие сертификацию компьютерной реализации: упрощенная аналитическая и имитационно-стохастическая модели (Методика, Приложение 2 и 4).

Компьютеризация и коммерциализация моделирования

Однако использование машинных языков более высоких уровней и возросший объем требований к программным средствам (software) определили необходимость углубления специальных знаний по программированию, что вызвало даже появление новой дисциплины «Информатика». Эти требования создали условия для определенного разделения труда:

- представители теории людских потоков сосредоточились на развитии предметной области знаний (исследованиях движения потоков разного состава людей);
- программисты специализировались на создании программных средств;
- пользователи-специалисты внедряли компьютерную систему в свою практическую деятельность: в многочисленные службы пожарного надзора, прежде всего, Департамента надзорной деятельности и профилактической работы МЧС России.

Архитектурно-строительное и противопожарное нормирование коммуникационных путей оказалось перекрестком интересов указанных групп специалистов.

<sup>8</sup> СНиП 21-01-97\*. Пожарная безопасность зданий и сооружений.

Такое разделение труда вполне соответствует принципам основоположников моделирования сложных систем, которые считали, что задача специалиста, разрабатывающего модель реального явления, заканчивается на создании его формализованной схемы, а ее математическое описание — прерогатива математиков и системотехников [41, 42]. Однако в данном случае эти принципы реализовались не совсем так, как предполагалось.

Среди серий натурных наблюдений, проведенных представителями школы теории людских потоков после установления закономерностей связи между параметрами людских потоков, особое значение имеют серии наблюдений потоков, состоящих из крайних возрастных групп населения: детей дошкольного возраста [43] и пожилых людей [44]. Это — возраст начала формирования психофизиологической системы человека и ее деградации. Результаты этих исследований опубликованы не только в России, но и за рубежом [45–47]. В результате проведенных новых исследований эмпирическая база данных  $\bar{V}_{D_j}^3 = \varphi(D_j)$  расширилась до 59 575 значений, полученных в 145 сериях натурных наблюдений [48]. Среди них — серии исследований закономерностей связи между скоростью и плотностью потока, состоящего из людей, имеющих физические отклонения [49–52].

Таким образом, многолетние и многочисленные исследования закономерностей движения потоков людей, состоящих из людей различных демографических групп населения с учетом их возраста и физического состояния, показали **инвариантность** (от лат. *invarians, invariantis* — неизменяющийся, неизменность, независимость от условий) установленной закономерности (6), поскольку эта закономерность согласуется (валидируется) с психофизиологической схемой тела — с моделью координации движений [53–56], формирующейся при взаимодействии [57] функциональных систем организма.

Что касается интереса к этой теме со стороны программистов-профессионалов, то впервые он был проявлен ООО «СИТИС», начавшим одним из первых в России заниматься разработкой информационных систем архитектурно-строительного проектирования. Потребовалось 1,5 года консультаций со специалистами в теории людских потоков и многократное тестирование разрабатываемых ими вариантов программ для того, чтобы в программе «Флоутек» добиться приемлемых для практики результатов [58]. Итоги сравнения результатов моделирования движения людских потоков, полученных при разных способах их реализации, были публично рассмотрены в печати [59].

Интересную реакцию вызвало появление Методики у ведущих специалистов экспертных органов. В статье одного из них читаем: «... людей,

способных качественно, с пониманием дела, выполнить данные расчеты, можно сосчитать по пальцам, и ни для кого не секрет, что их выполнение по утвержденным методикам требует весьма глубоких познаний в самых разнообразных отраслях науки» [60, с. 56].

Познание закономерностей людских потоков действительно потребовало привлечения комплекса знаний из различных отраслей науки [24, 25]. Но для пользователя не обязательно знать о научных умозаключениях, на основании которых построены нормативы. Ему важно, чтобы нормативы им соответствовали. К тому же, программы для ЭВМ скрывают от пользователя операции расчета, а дают готовый итоговый результат; поэтому пользователи этих программно-вычислительных комплексов не только теряют навык разработки поэтапного расчета, но и не могут его проконтролировать. А специалисты-программисты, как показывает опыт общения с ними на примере ООО «СИТИС», не имеют, как правило, понятия о сути моделируемого явления. Исходя из такого положения, принципы и примеры аналитического расчета и графического изображения его результатов продолжают излагаться в учебном процессе и после появления компьютерных программ. Например, сопоставительному анализу результатов расчетов по различным моделям и сегодня посвящена отдельная глава в учебном пособии. Поэтому проверка корректности компьютерных расчетов не требует «весьма глубоких познаний в самых разнообразных отраслях науки». Нужно просто сравнить результаты аналитического расчета времени движения людского потока по отдельным участкам пути (2), используя табличные значения зависимости  $\bar{V}_{D_j}^3 = \varphi(D_j)$  из Методики или СНиП II-2-80, с результатами, получаемыми по демонстрационным программам коммерческих программно-вычислительных комплексов.

Для примера достаточно рассмотреть две ситуации.

Первая ситуация — по горизонтальному участку пути движется однородный людской поток смешанного состава, имеющий то или иное значение плотности  $D$  (от 0,1 до 0,9) (рис. 5). Требуется определить время движения людского потока (его замыкающей части) по этому участку пути.

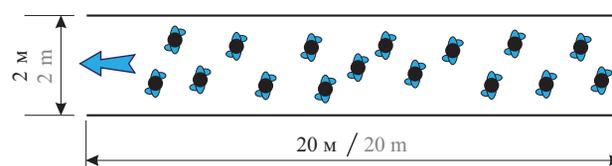


Рис. 5. Схема горизонтального участка пути длиной  $l$ , занятого людским потоком плотностью  $D_i$

Fig. 5. Diagram of horizontal area of the route with  $l$  length, occupied by human flow with  $D_i$  density

В качестве второй ситуации рассмотрим такой же горизонтальный участок пути, но заканчивающийся дверным проемом (рис. 6). Здесь требуется определить время выхода замыкающей части потока за пределы проема.

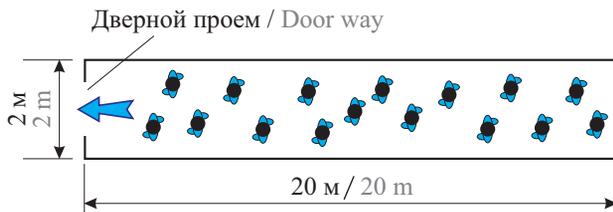


Рис. 6. Схема горизонтального участка пути, заканчивающегося дверным проемом

Fig. 6. Diagram of the horizontal area of the route ending with the door way

Такие проверки, а именно аналитический расчет для вышеизложенных ситуаций, — рядовое мероприятие в учебном процессе, приучающее выпускников Академии ГПС МЧС России к обоснованному, а не компилятивному мышлению. (Компиляция от лат. *compilatio*, букв. — **ограбление**, составление сочинений на основе чужих исследований или чужих произведений без самостоятельной обработки источников). Однако публичные обсуждения результатов одного из таких мероприятий вызвали возражения владельцев новых коммерческих программно-вычислительных комплексов. При этом для доказательства состоятельности своего мнения они используют прямо противоположные доводы и средства.

Одни из них, например руководитель Института технического регулирования и независимой экспертизы (Интернэкс), в письме (исх. № 02/04 от 10 апреля 2019 г.) начальнику Академии ГПС МЧС России пишет следующее:

«3. Компьютерные программы, программы для ЭВМ для расчетов пожарного риска обязательному подтверждению соответствия в форме декларирования соответствия или в форме обязательной сертификации не подлежат.

4. Компьютерные программы, программы для ЭВМ для расчетов пожарного риска не проходят добровольную сертификацию в системе добровольной сертификации ГОСТ Р, в связи с отсутствием документов по стандартизации, на соответствие которым проходило бы такое подтверждение.

5. Методика определения расчетной величины пожарного риска каких-либо **требований к программной реализации не содержит и не предъявляет, показателей качества программного обеспечения не устанавливает**».

Другие (владельцы «Сигма ПБ») собирают и сертификаты, и обилие отзывов от авторитетов, среди которых и Академия ГПС МЧС, и ВНИИПО МЧС РФ, и депутат Государственной Думы, и т.п.

Однако, кто бы ни требовал сертифицировать или не сертифицировать что-либо, логика здравого смысла [61] заставляет человека самому **проверить обеспечение первостепенного условия его безопасности — своевременность эвакуации:  $t_p \leq t_{нб}$** .

Поэтому сделаем это, прежде всего, для ситуации беспрепятственного движения людского потока, представленной на рис. 5.

Для этого сначала рассчитаем время движения его замыкающей части  $t_p$  по формуле (3) с использованием данных  $\vec{V}_{D_j}^3 = \varphi(D_j)$ , приведенных в табл. П 2.1 Методики. Затем определим эту величину  $t_p$ , пользуясь программами демонстрационных вариантов коммерческих программно-вычислительных комплексов. Вычислим отклонения  $\Delta t_i$  полученных результатов при последовательном изменении плотности на участке:  $\Delta t_i = t_p - t_{пн}$  и выразим их в процентах по отношению к  $t_p$ . Полученные результаты представлены на рис. 7 и в табл. 2.

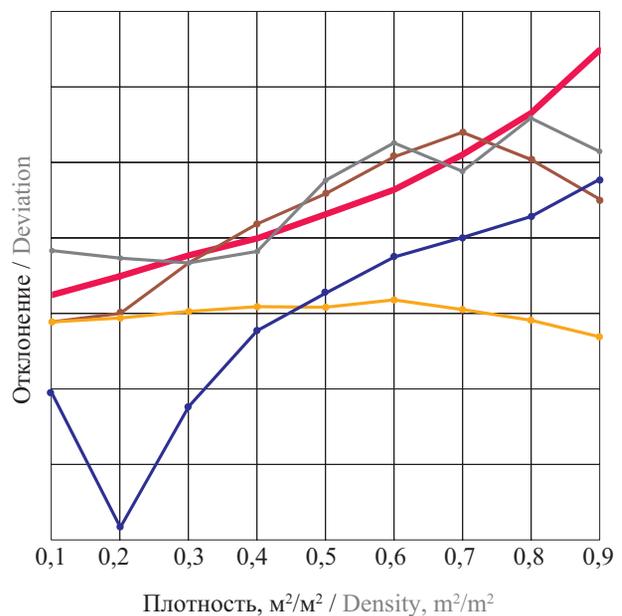


Рис. 7. Графики отклонений значений  $\Delta t_p$  при беспрепятственном движении людского потока по участку, полученные по программам вычислительных комплексов «Сигма ПБ» — —, «Урбан» — —, Fenix+ — —, «Фогард Рв» — —, от значений  $t_p$ , полученных при расчете, соответствующем упрощенной аналитической модели, — —

Fig. 7. Value deviations graphs  $\Delta t_e$  at unobstructed movement of a human flow through the area, received under programs of computing systems: Sigma PB — —, Urban — —, Fenix+ — —, Fogard Rv — — from values  $t_e$  received from a simplified analytical model calculation, — —

**Таблица 2.** Отклонения, %, значений  $t_p$ , полученных по программам коммерческих вычислительных комплексов, от значений  $t_p$ , полученных в соответствии с Методикой

**Table 2.** Deviations (in %) of the  $t_e$  values obtained by the programs of commercial computing systems from the  $t_e$  values obtained by Method 2

Программа Program	Отклонение при плотности людского потока Deviation at the density of human flow								
	0,1	0,2	0,3	0,4	0,5	0,6	0,7	0,8	0,9
«Сигма ПБ» / Sigma PB	-7,1	-9,9	-2	3,8	5,5	8,7	5,9	-12,3	-39,4
«Урбан» / Urban	11,8	4,8	-2	-3,4	9	12,4	-4,4	-1,3	-26,8
Fenix+	-7,1	-11,1	-14,9	-18,1	-24,7	-29,2	-41,1	-54,9	-76
«Фогард Рв» / Fogard Rv	-26,1	-66,7	-40,1	-24,5	-20,9	-17,9	-22	-27,4	-34,3

Графики на рис. 7 и данные табл. 2 заставляют обратить внимание на то, что наибольшие значения отклонений приходятся на максимальные значения плотности людского потока. Поскольку такие значения плотности потока наиболее характерны для ситуаций с образованием скоплений людей, вызванных недостаточной пропускной способностью проемов, то целесообразно проанализировать ситуацию, представленную на рис. 6.

В теории людских потоков дверной проем рассматривается как отдельный вид пути, хотя плоскость пола, по которой идет поток людей, остается горизонтальной. Причина этого состоит в следующем: «Движение эвакуационных потоков через двери представляет в условиях вынужденной эвакуации один из наиболее ответственных этапов, так как именно в этих местах обыкновенно образуются так называемые «пробки», возникновение которых, как показывает практика, часто оказывалось причиной несчастных случаев с людьми. ... В.А. Эллисон [62] приводит описание целого ряда случаев катастроф, имевших место в зданиях массового назначения, когда, **благодаря заклиниванию человеческими телами выходов, многие люди оказывались задавленными на смерть или получившими серьезные увечья.** Во время одной из катастроф (1879 г. Нью-Йорк, театр Броклона), вызвавшей панику среди зрителей, погибло 283 человека из-за того, что сразу после начала эвакуации двери из зрительного зала оказались забытыми телами. При вытаскивании обезумевших людей с наружной стороны дверей многие оставались совершенно без платья, которое разрывалось по всем направлениям. ... Поэтому **знание количественных характеристик этого процесса имеет важное практическое значение**» [63].

J.J. Fruin также рассказывает, как он попал в подобную ситуацию на железнодорожном вокзале одного из городов США, когда метель нарушила

железнодорожное сообщение: «Тысячи застрявших пассажиров собрались в большой, но ограниченной области перед общей дверью выхода на платформу. Среднее занятие пешеходной зоны было, вероятно, 1,5 квадратных футов на человека. **Волны «сотрясений» пробегали по толпе, как будто это была единая объединенная масса, буквально сметая людей с ног.** Полиция, пытающаяся управлять толпой, была отброшена назад толчками, которые они не могли остановить, даже притом, что они сцепили руки. Хотя некоторые поезда прибыли, в этот период они были недоступны, потому что для пассажиров было невозможно двинуться через плотную толпу к входам на платформу, которые были всего на расстоянии в двадцать футов» [64].

Наглядную иллюстрацию состояния людей, попавших в скопление, дает фотография, приведенная на рис. 8.



**Рис. 8.** Фрагмент образования скопления людей, чреватого возникновением компрессионной асфиксии<sup>9</sup>

**Fig. 8.** A fragment of a crowd that could lead to compressive asphyxia<sup>9</sup>

<sup>9</sup> Er hat überlebt! URL: <https://deinweckruf.wordpress.com/category/duisburg/>

А.И. Милинский обращает особое внимание на возможное «проявление крайней грубости во всей ее ужасающей наготе, когда возникает борьба за выход, за право быстрее уйти от источника опасности». Как пример, он приводит случай, произошедший в 1923 г. на новогодней елке для детей в одном из зданий Мичигана. Он пишет: «В момент раздачи подарков кто-то крикнул «Пожар!», в результате чего началась паника. Один из присутствовавших, человек высокого роста, громадной физической силы и обладатель внушительного голоса, пытался остановить детей, преграждая путь к лестнице, но был смят и растоптан. Его искалеченный труп обнаружен на том же месте. При панике погибло 83 человека, из коих 60 человек детей» [63, с. 124–125]. А.И. Милинский считает: «Перенесение результатов наблюдений за движением потоков через двери в спокойных условиях непосредственно на условия аварийной эвакуации, невозможно, так как неизбежно привело бы к крупной ошибке, вытекающей из значительной разницы между режимами движения в спокойных и аварийных условиях.

Искусственное создание в общественном месте, ради наблюдения, обстановки аварийной эвакуации, также недопустимо, ибо сопряжено с большим риском.

Вместе с тем оставление этого важного вопроса вообще без внимания представляется невозможным» [63, с. 87].

Ввиду сказанного, он решил провести моделирование движения людских потоков через дверной проем на специально созданной установке (рис. 9), представляющей из себя бесконечную брезентовую ленту, натянутую на вращающиеся валики. «Общее

количество опытов на модели составило ... 2700» [63, с. 92].

Эти опыты позволили А.И. Милинскому впервые зафиксировать эффект образования арки перед дверным проемом (рис. 10, а) и определить систему и величину сил, действующих на человека, зажатого в арке (рис. 10, б).

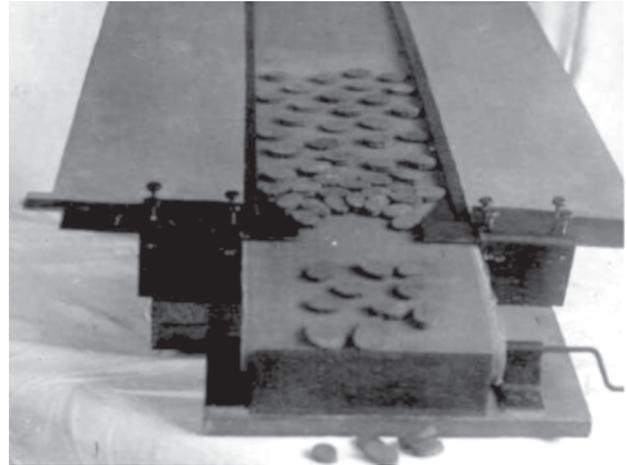


Рис. 9. Установка А.И. Милинского для моделирования движения людских потоков через двери

Fig. 9. A.I. Milinsky plant for modeling the movement of human flows through doors

Позже выяснилось, что эффект образования арки является характерным явлением и при движении сыпучих тел овальной формы (рис. 10, в). Этот факт свидетельствует об объективности картины процесса, моделируемого на установке Милинского (на рис. 9 хорошо просматривается образование арки).

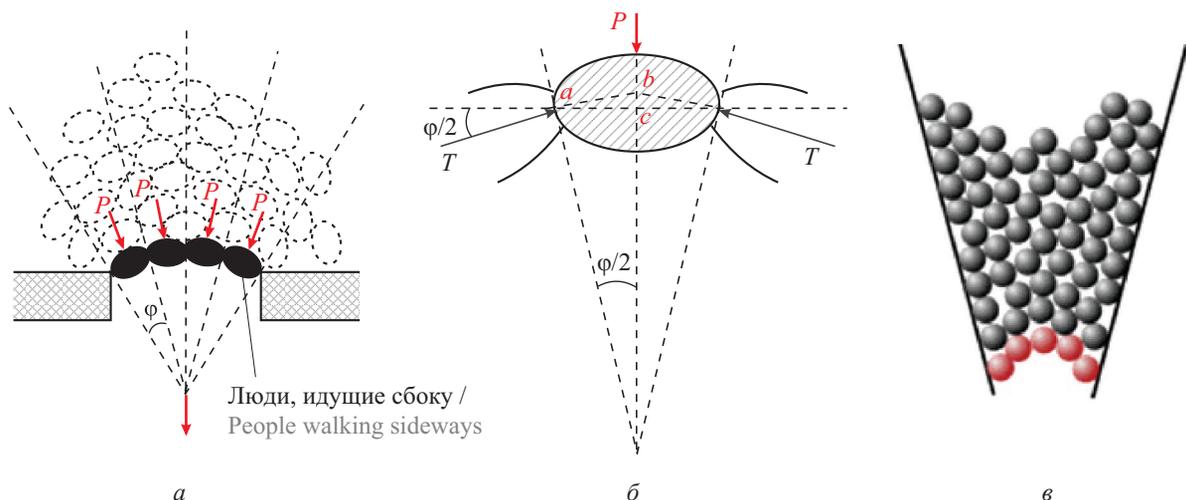


Рис. 10. Скопление людей перед проемом: а — образование арки; б — силы, действующие на тело человека, заклиненного в арке; в — образование арки в сыпучей среде (красные шарики)

Fig. 10. A crowd of people in front of the door way: а — formation of an “arch”, б — forces acting on the human body stuck in an arch, в — formation of an arch in a loose medium (red balls)

А.И. Милинский отмечает: «Существенное отличие модели от действительных условий состоит в том, что в то время, как натуральные люди обладают известной индивидуальной волей и некоторой свободой действий (хотя и ограниченной при остро протекающей эвакуации), модели «людей» являются неодушевленными телами, полностью лишенными этой воли и индивидуальной свободы действий» [63, с. 91]. Поэтому В.А. Копыловым были проведены экспериментальные исследования на «натуральных людях» в условиях, приближающихся к аварийным [64].

Обобщение результатов исследований А.И. Милинского и В.А. Копылова позволило установить **зависимость пропускной способности дверного проема  $Q$  от его ширины  $\delta$  при плотности потока перед ним 0,9 и более:**

$$Q = \delta(2,5 + 3,75\delta). \quad (8)$$

При этом учитывались установленные к тому времени закономерности связи между параметрами людских потоков.

С 1980 г. требование учета влияния ширины дверного проема на его пропускную способность при плотности потока 0,9 и более входит во все отечественные нормативные документы по обеспечению безопасности людей при эвакуации в виде нормирования величины интенсивности движения через проем при его ширине менее 1,6 м:

$$q = 2,5 + 3,75\delta. \quad (9)$$

Следовательно, в ситуации, представленной на рис. 6, при плотности потока на участке  $D = 0,9$  и ширине проема  $\delta = 0,8$  м, интенсивность движения через него составит:  $q_{0,8} = 2,5 + 3,75 \cdot 0,8 = 5,5$  м/мин. Количество людей  $N$  на участке при выражении через площадь горизонтальной проекции тела человека  $f$ , м<sup>2</sup>/ чел., составит:  $N = 0,9 \cdot 20 \cdot 2 = 36$  м<sup>2</sup> или, при  $f = 0,1$  м<sup>2</sup>/ чел.,  $N = 360$  чел.

Время выхода людей на участок, расположенный после дверного проема, определяется по формуле:

$$t = Nf/Q. \quad (10)$$

Дверной проем не имеет длины, поэтому скорость не является параметром движения в проеме. При  $\delta = 0,8$  м это время составит  $t_{0,8} = 36/(5,5 \cdot 0,8) = 8,18$  мин = 490,9 с. При ширине проема  $\delta = 1,2$  м аналогичные арифметические расчеты дают следующие результаты:  $q_{1,2} = 7,0$  м/мин;  $Q = 8,4$  м<sup>2</sup>/мин;  $t_{1,2} = 4,29$  мин = 257,1 с.

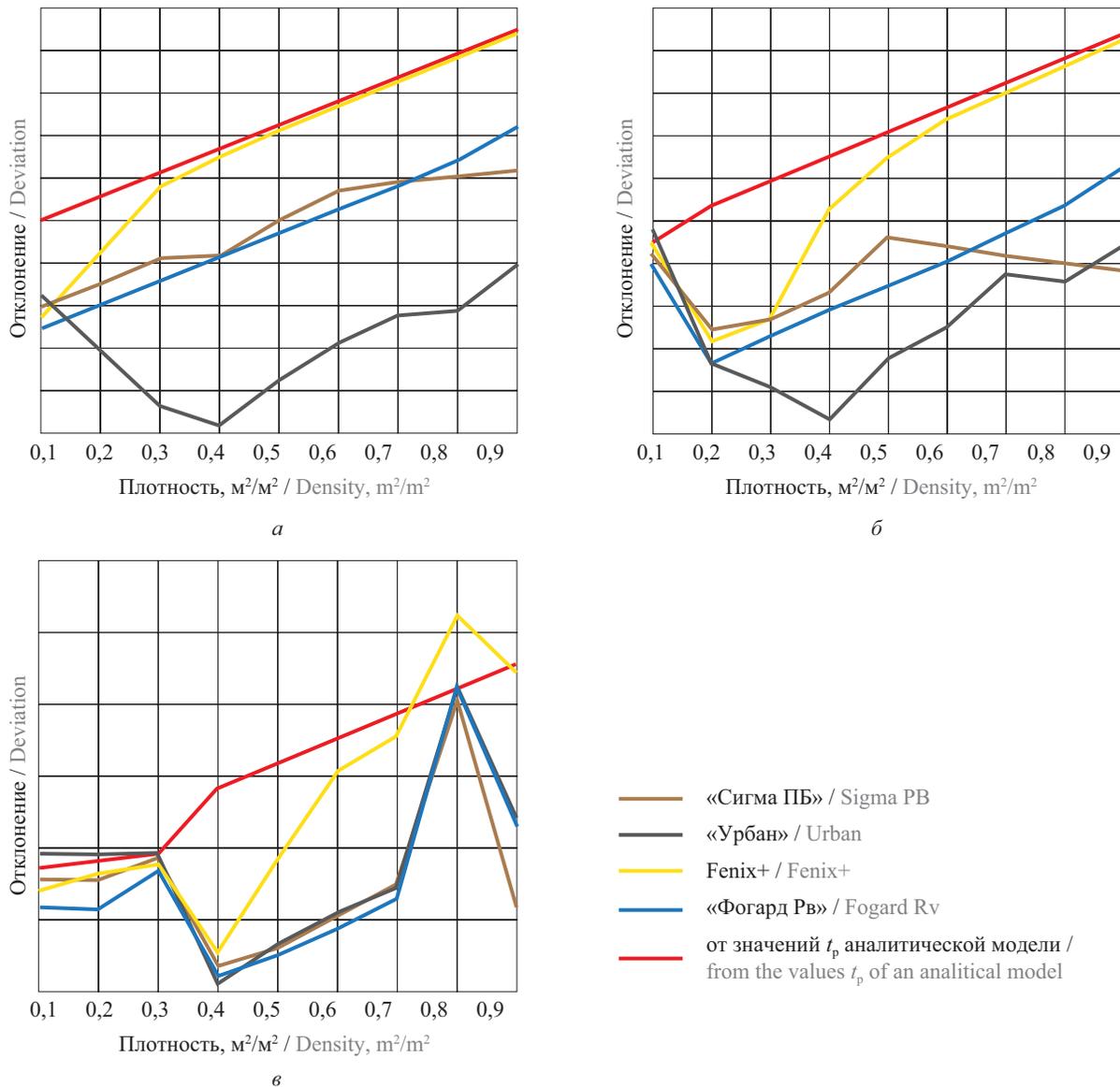
Что же дают для этой ситуации рассматриваемые коммерческие продукты?

Для сопоставительного анализа их результатов составлена табл. 3, данные которой затем использованы при построении графиков на рис. 11.

**Таблица 3.** Результаты сопоставительного анализа программно-вычислительных комплексов эвакуации людей

**Table 3.** Results of comparative analysis of software and computing systems of evacuation of people

Программа Program	Отклонение от аналитического расчета при плотности людского потока Deviation from analytic calculation at human flow density:								
	0,1	0,2	0,3	0,4	0,5	0,6	0,7	0,8	0,9
Ширина проема 0,8 м / Door way width 0.8 m									
«Сигма ПБ» / Sigma PB	-210,3	-209,9	-206,4	-257,1	-231,8	-215,3	-245,2	-285,9	-329,5
«Урбан» / Urban	-184,2	-374,3	-554,4	-652,4	-599,2	-568,0	-558,3	-599,4	-545,9
Fenix+	-229,3	-141,4	-38,2	-23,1	-13,2	-9,8	-7,1	-6,3	-5,1
«Фогард Рв» / Fogard Rv	-257,6	-258,9	-258,0	-257,1	-256,9	-255,4	-252,9	-248,8	-226,8
Ширина проема 1,2 м / Door way width 1.2 m									
«Сигма ПБ» / Sigma PB	-13,6	-146,1	-163,7	-158,6	-124,0	-163,3	-201,7	-239,2	-275,3
«Урбан» / Urban	11,8	-185,5	-242,8	-308,2	-266,4	-257,1	-223,6	-262,9	-247,4
Fenix+	-2,7	-159,5	-161,3	-61,0	-29,0	-14,1	-10,9	-7,9	-5,8
«Фогард Рв» / Fogard Rv	-26,1	-184,1	-181,9	-180,1	-179,6	-178,7	-177,0	-173,8	-157,4
Ширина проема 1,6 м / Door way width 1.6 m									
«Сигма ПБ» / Sigma PB	-7,1	-9,9	-2,0	-124,1	-127,3	-121,5	-119,8	-8,8	-170,1
«Урбан» / Urban	11,8	4,8	1,9	-135,3	-126,2	-120,6	-120,5	-1,3	-108,9
Fenix+	-15,4	-7,5	-7,1	-113,9	-65,8	-23,1	-15,2	50,4	-6,9
«Фогард Рв» / Fogard Rv	-26,1	-32,5	-12,8	-132,2	-131,5	-131,7	-128,7	-1,6	-113,7



**Рис. 11.** Графики отклонений значений  $\Delta t_p$  при движении людского потока по участку, заканчивающемуся дверным проемом шириной: а — 0,8 м; б — 1,2 м; в — 1,6 м, полученные по программам вычислительных комплексов.

**Fig. 11.** Value deviations graphs  $\Delta t_p$  during the movement of the human flow in the area ending with a doorway wide: а — 0.8 m; б — 1.2 m; в — 1.6 m, obtained by the programs of computer systems.

Итак, что же мы имеем в результате проведения элементарных арифметических вычислений?

Прежде всего, отметим, что ни в одной из программ вычислительных комплексов **отклонение  $\Delta t$ , не соответствует технически приемлемой точности (3...5 %)**, установленной на заре применения ЭВМ в расчетах движения людских потоков [15].

Затем обратим внимание на графики отклонений расчетного времени  $\Delta t_p$ , которые демонстрируют рис. 7 и 11. Они наглядно показывают парадоксальные величины этих отклонений в программах рассматриваемых комплексов от расчетных, полученных на основании данных Методики. Как можно

видеть, наибольшей быстротой движения отличаются «люди» из программ «Фогард Рв» и «Сигма ПБ». Отрицательные значения отклонений показывают, что скорость движения агентов, заложенная в коммерческие программно-вычислительные комплексы, намного выше данных, представленных в Методике, а ограничения пропускной способности проемов приведут при эвакуации к гибели реальных людей.

Формула (3) позволяет вычислить скорости движения потока:  $V_i = l/t_i$  и построить графики ее зависимостей от плотности. Если это сделать, то обнаружится, что в программно-вычислительных ком-

плексах применены зависимости  $\bar{V}_{D_i}^{\partial} = \varphi(D_i)$ , не соответствующие приведенным в таблице П2.1 Методики, т.е. **принцип верификации при их применении не соблюдается**.

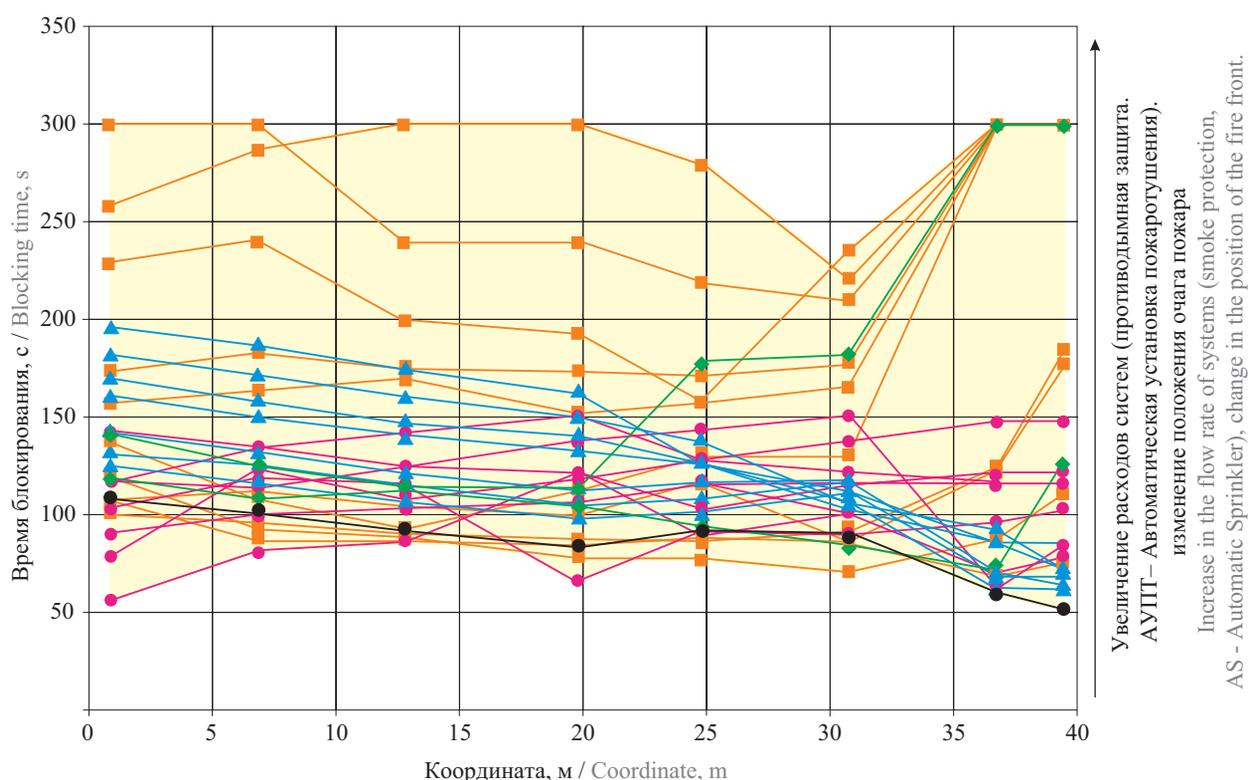
Например, при  $D_i = 0,2$  по табл. П2.1 Методики скорость движения по горизонтальному пути:  $V = 60$  м/мин; по табл. 2 видим, что отклонение от этого значения в «Форвард Рв» составляет 66,7 %, т.е. 40,02 м/мин. Следовательно, скорость движения, рассчитанная в программе «Форвард Рв», при этой плотности потока равна 100,02 м/мин! (Можно отметить, что этот факт косвенно отмечается и в заключении Академии ГПС МЧС России на обращение «Сигма ПБ»: «... все пользователи различных программных продуктов, просчитывая пожарные риски для одного и того же здания, получают различные значения»).

Поскольку безопасность эвакуации людей при пожаре определяется, прежде всего, ее своевременностью, требующей выполнения условия:  $t_{э,i} \leq t_{нб}$ ,

то естественно возникает вопрос: «Каким же временем располагает человек для того, чтобы безопасно эвакуироваться?». Для этого необходимо определить возможное значение величины  $t_{нб}$ .

Для установления значений  $t_{нб}$  при возможных режимах функционирования активных систем противопожарной защиты было проведено более 80 серий численного моделирования процесса газодинамики ОФП [66], выполненных по программе FDS (fire dynamic simulator) [67] (рис. 12).

При этом расчетное время эвакуации  $t_p$  по этажу должно быть уменьшено на величину времени начала эвакуации из помещений, которое может быть принято не ниже времени блокирования выхода из помещения, указанного на графике на рис. 13. Эти графики наглядно демонстрируют, что для своевременной эвакуации у людей имеются считанные десятки секунд. Поэтому корректное определение расчетного времени эвакуации  $t_p$  эквивалентно сохранению здоровья и жизни людей.



**Рис. 12.** Область решений по выбору систем обеспечения пожарной безопасности: ● — без систем противопожарной защиты; ● — изменение расположения помещения очага пожара и клапана дымоудаления; ■ — изменение расхода воздуха через клапан дымоудаления; ▲ — изменение расхода воды системы пожаротушения (дренчерная завеса); ◆ — изменение расхода воздуха через клапан дымоудаления и расхода дренчерной системы пожаротушения (дренчерная завеса)

**Fig. 12.** The field of solutions for the selection of fire safety systems: ● — without fire protection systems; ● — change in the location of the fire bed and smoke exhaust vent spot; ■ — change in the air flow rate through the smoke exhaust vent; ▲ — change in the water flow rate of the fire-fighting system (water curtain); ◆ — change in the air flow rate through the smoke exhaust vent and the flow rate of the deluge system (water curtain)

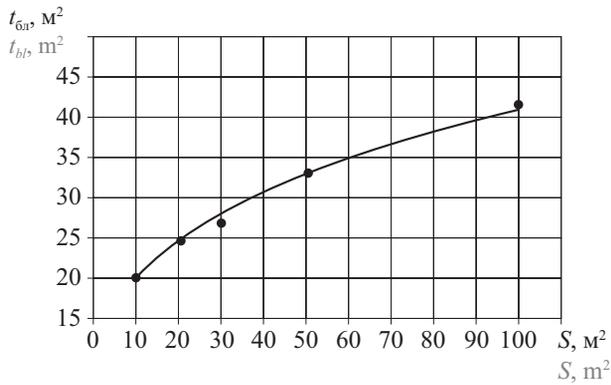


Рис. 13. График зависимости времени блокирования от площади помещения  $t = f(S)$  без учета применяемых в нем средств пожаротушения и противодымной защиты

Fig. 13. Dependence graph of blocking time on the area of a premise  $t = f(S)$  without taking into account fire-fighting and smoke protection equipment used in it

Но, как написано в экспертной оценке кафедры надзорной деятельности Академии ГПС МЧС России в ответ на запрос депутата Государственной Думы Федерального Собрания Российской Федерации относительно сертификации программных продуктов для расчета пожарных рисков, есть **проблема: все пользователи различных программных продуктов, просчитывая пожарные риски на одно и то же здание, получают различные значения.** Такая ситуация приводит к разночтению выводов, т.е. в одном расчетном обосновании — соответствие нормативному значению пожарного риска, а в другом расчетном обосновании на тот же объект — несоответствие, для исключения которого **необходимо выполнить дополнительные более дорогостоящие требования пожарной безопасности**, например, автоматическое пожаротушение и противодымную защиту. ... Таким образом, отсутствие эталонного программного продукта в РФ влечет за собой неоднозначные выводы, что приводит к диаметрально противоположным правовым последствиям».

В этой цитате очень деликатно охарактеризован **объект стяжательства** (стремление к наживе, корыстолюбие, накопительство, алчность) — **«дорогостоящие требования пожарной безопасности»** объекта.

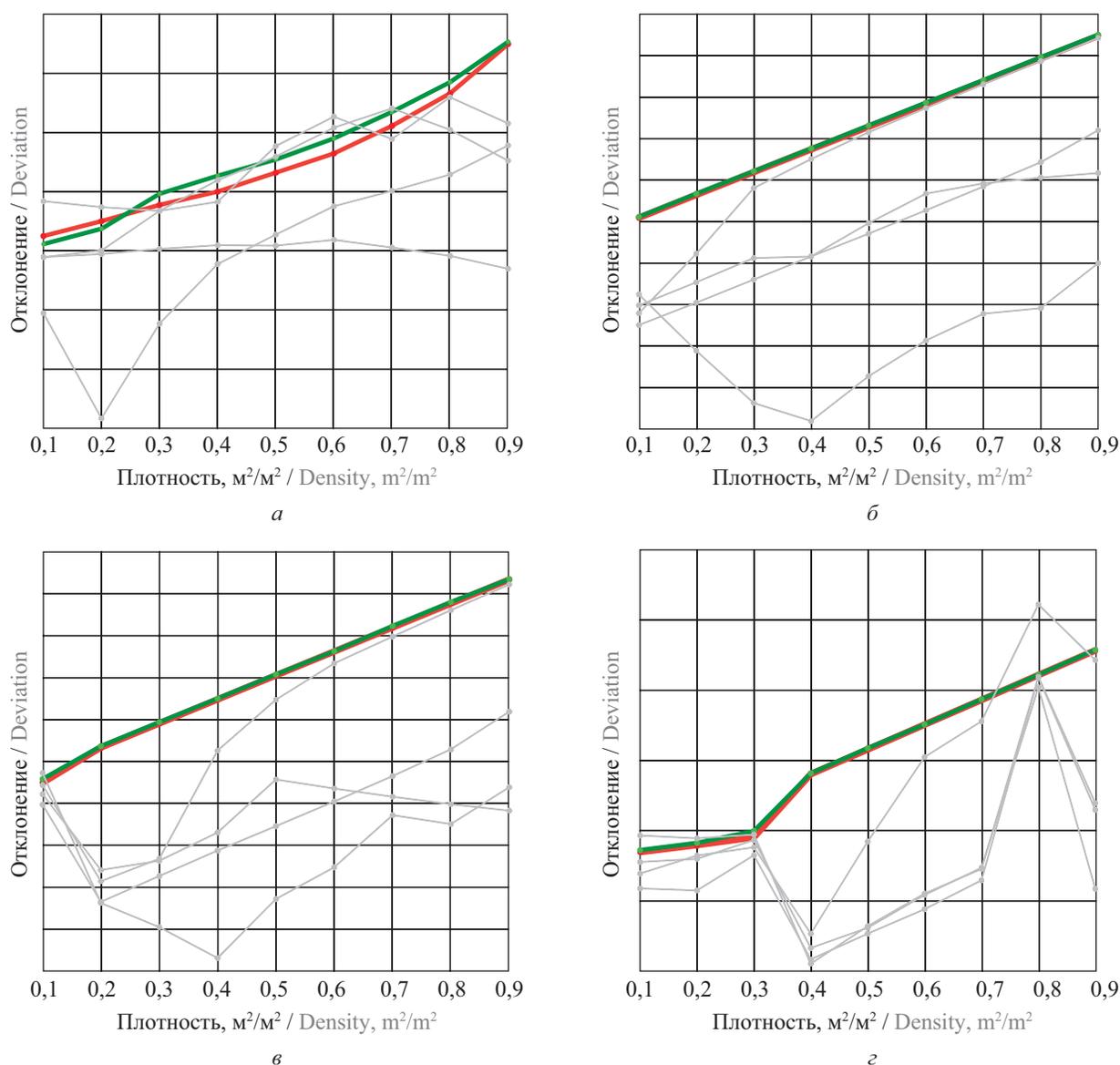
Кто является его заказчиком? Очевидно, что **заказчик строительства** объекта (а не его конечные потребители: жильцы, посетители). Здесь уместно будет вспомнить слова Т.Д. Данинга, процитированные К. Марксом в «Капитале» [68]: «Обеспечьте капиталу 10 % прибыли, и капитал согласен на всякое применение, при 20 % он становится оживленным, при 50 % положительно готов сломать себе голову, при 100 % он попирает все человеческие зако-

ны, при 300 % нет такого преступления, на которое он не рискнул бы пойти, хотя бы под страхом виселицы» [69].

Такой заказчик начинает искать поделщиков. И находит их в лице людей, способных повлиять тем или иным способом на требования к пожарной безопасности объекта. Среди них оказываются и владельцы новых коммерческих программно-вычислительных комплексов, которые **под предлогом необходимости некоего программного продукта** делают попытки подмены системно обоснованного нормативного документа — Методики. На самом деле, как мы показали, это связано не с необходимостью, а с удобством пользования. Удобство же пользования обеспечено еще до создания этого документа. Поэтому спрашивается: «Что можно в данном случае сертифицировать?»

Структуру любого программно-вычислительного комплекса можно подразделить укрупненно на три части: прикладное программное обеспечение (ПО), инструментальное программное обеспечение и предметная модель. Прикладное ПО предназначено для выполнения конкретных заданий различного характера. Инструментальные ПО разрабатываются для создания новых программ (в настоящее время получают широкое распространение также программы с использованием графического интерфейса). Предметная модель — обобщенное название представления того явления (предмета, процесса), ради воспроизводства которого и создается тот или иной программно-вычислительный комплекс. Важнейшим требованием к предметной модели является ее адекватность, соответствие основным свойствам реального явления. В рассматриваемом нами случае это явление — совместное движение группы людей. Его характерное, специфическое свойство — **психофизиологическое взаимное влияние людей на движение друг друга**, моделью которого и является открытая закономерность связи между параметрами их движения [25]. **Эта закономерность сама по себе и является сертификатом соответствия.**

Следует обратить внимание на то, что все три модели, приведенные в Методике, используют общие закономерности зависимостей между параметрами движения людей в них. Сами модели — лишь **описание способа** функциональной реализации живой системой установленной закономерности в виде **поточного движения**. Даже имитационно-стохастическая модель в Методике реализована как совокупность отдельных реализаций этой закономерности. Она лишь имитирует, а не воспроизводит, изменение возможных состояний людей в отдельные моменты времени. При намерении добросовестно отнестись к компьютеризации этих моделей возможно воспользоваться программным



**Рис. 14.** Графики отклонений значений  $\Delta t_p$  при беспрепятственном движении людского потока (а) и при движении людского потока по участку, заканчивающемуся дверным проемом шириной 0,8 м (б), 1,2 м (в) и 1,6 м (г), полученные в результате использования в программе Pathfinder (—), от значений  $t_p$  аналитической модели (—).

**Fig. 14.** Value deviation graphs  $\Delta t_e$  in case of unobstructed movement of human flow (a) and in case of movement of human flow through the area ending with a door way of width: (b) 0.8 m, (c) 1.2 m, (d) 1.6 m, obtained using Pathfinder program — from  $t_e$  analytical model values, —.

комплексом Pathfinder, допускающим вариации закономерностей предметной модели. Результаты его применения с использованием установленных зависимостей между параметрами людских потоков (6) для ситуаций, представленных на рис. 5 и 6, иллюстрируются графиками на рис. 14.

Как видно, они практически совпадают с графиками, полученными аналитическим способом, т.е. находятся в пределах 5 % отклонений, которые были установлены 40 лет назад [15]! Но они не освобождают от необходимости «выполнить

дополнительные, более дорогостоящие требования пожарной безопасности».

### Выводы и предложения

Устанавливая заниженные значения  $t_p$  и игнорируя влияние пропускной способности проемов, авторы рассматриваемых коммерческих программно-вычислительных комплексов **сознательно вводят в заблуждение их приобретателей относительно пожарной безопасности людей в здании.**

В экспертной оценке Академии ГПС МЧС России, подготовленной в ответ на запрос депутата Государственной Думы России<sup>10</sup>, затрагивается вопрос «О судебно-экспертной деятельности в Российской Федерации» (проект Федерального закона № 306504-6). Представляется, что для повышения ответственности разработчиков программно-вычислительных комплексов за обеспечение безопасности людей при пожаре было бы правильным включить и их в сферу ответственности перед этим законом.

В этой оценке Академии ГПС МЧС России содержится и предложение по разработке **эталонного программного продукта** совместными усилиями специалистов различного профиля под руководством признанных авторитетов. Разработка такого эталонного продукта предусматривает создание **нового органа по сертификации программного лицензионного обеспечения для оценки пожарных рисков**.

Мы думаем, что это должна быть международная координация усилий ведущих специалистов различного профиля, результаты работ которых смогут быть задействованы в создании такого продукта. Пока же мы наблюдаем их разрозненные попытки [6, 7, 70] моделирования возможных изменений структуры потока при различных способах его описания:

- **поточное движение** — «течение» людей через элементы коммуникационных путей [7, с. 40]. К таким моделям [6, 71, 72] за рубежом относят модели, описанные в публикациях Stahl [73], Kisko è Francis [74], Fahy [75];
- **сетевое движение** — движение по ячейкам площади коммуникационных путей, последовательно переступая в которые люди осуществляют свое перемещение к выходам (Ketchell è Cole [76], Galea [77], Mott McDonald [78]);
- **движение с непрерывной возможностью изменений значений параметров перемещения людей** — оно первоначально освещалось за рубежом в публикациях [79–84]. Этот подход наиболее близок к методике имитационно-стохастического моделирования, разработанной в России в начале 1980-х гг. [24].

К сожалению, составители технического отчета ISO [85] не сумели обобщить накопившийся опыт моделирования движения людей в потоках. Жизненная необходимость учета изменений демографической структуры населения во всех странах мира [86–88] заставляет авторов этих моделей возвращаться вновь к их рассмотрению и после пу-

бликации этого отчета [89–94], что объясняется их стремлением более полно учесть особенности поведения людей, обладающих разной подвижностью. Их усилия направлены на построение моделей поведения каждого из них в общем движении. Эти модели не имеют еще общего названия. Но ясно, что они должны будут затронуть и предметную модель, расширив ее до вероятности индивидуального и группового маневрирования в зависимости от возраста людей и ограничений возможности их передвижения. Следует отметить актуальность построения такой модели и для России, где количество людей с ограничением подвижности определено Государственной программой<sup>11</sup> как 40 % населения страны.

**Мы считаем, что пришло время создать «общечеловеческий» программный продукт, моделирующий эвакуацию людей любой подвижности в различных условиях эксплуатации зданий и сооружений.** Этот программный продукт должен быть доступен безвозмездному использованию заинтересованными лицами, поэтому он подлежит свободному распространению в сети Интернет. Такой подход соответствует тенденциям устойчивого развития, к которому призывает ООН [95] для обеспечения условий существования человечества на земле.

Поскольку цель этого программного продукта — повышение безопасности людей, то его ядром будет модель реального процесса, выраженная через установленные закономерности связи между параметрами движения людей [25]. Непрерывное отображение вероятной кинематики движения людей с учетом их возрастного, физического и эмоционального состояния целесообразно будет производить при помощи модели изменения состояния людей в моменты времени, названные «физиологическим моментом» [97, 98]. При этом следует быть готовыми к столкновению с нюансами результатов исследований людских потоков, известными уже сегодня.

Первый из таких нюансов связан с тем, что «отцы эмпирики» [13, 22, 64, 99–102] при установлении зависимости  $V_{D_j} = \varphi(D_i)$  используют разные размерности для измерения  $D_i$ . Как показывает гносеология людских потоков [21], все они могут быть выражены зависимостью (7). Однако при моделировании кинематики отдельных людей более целесообразно пользоваться той размерностью плотности,

<sup>10</sup> Об утверждении государственной программы Российской Федерации «Доступная среда»: Постановление Правительства РФ от 15.04.2014 № 297.

<sup>11</sup> О продлении до 2020 года срока реализации государственной программы «Доступная среда»: Распоряжение Правительства РФ от 27.10.2014 № 2136-р

<sup>10</sup> Письмо Академии ГПС МЧС России № 2791-1-14 от 19 июля 2017 г. депутату Государственной Думы Федерального Собрания Российской Федерации И.М. Тетерину.

которую ощущает каждый из них, т.е. расстоянием до окружающих людей.

Второй нюанс, который скорее следует рассматривать как парадокс, обнаруживается, когда пишут о «**наиболее часто используемой норме ширины выхода на человека** (5 мм/чел.), которая применяется для расчета пропускной способности выхода в соответствии с руководством по проектированию» [6, 7]. В решении этого парадокса правильнее ориентироваться на французские и немецкие нормы проектирования, назначающие ширину двери кратной размеру тела человека.

Следует иметь в виду, что, если такой программный продукт будет охватывать не только условия аварийной эвакуации, но и условия превен-

тивной эвакуации при приближающейся природной чрезвычайной ситуации или условия эвакуации при повседневной эксплуатации зданий, то необходимо будет вводить категорирование движения для демографических групп населения в различных условиях эксплуатации зданий и сооружений. В международной практике нормирования подобный опыт отсутствует.

Впрочем, не будем торопиться и посмотрим, хватит ли благих намерений органов, ответственных за безопасность людей<sup>12</sup>, на разработку такого программного продукта.

<sup>12</sup> Приоритетные направления развития науки, технологий и техники в Российской Федерации (утв. указом Президента РФ от 7 июля 2011 г. № 899).

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Kholshchevnikov V.V., Predtechenskiy V.M.* Analysis and modeling the relationships between pedestrian flow parameters // International Council for Building. Report No. 14/86/37. 1986. 14 p.
2. *Kholshchevnikov V.V.* Foot traffic flows: actual observations, experiments and theory // Fire Bridge: Proceedings of International Conference. Northern Ireland, University of Ulster, 2–6 September 2000. 20 p.
3. *Холщевников В.В., Самошин Д.А., Галушка Н.Н.* Обзор компьютерных программ моделирования эвакуации зданий и сооружений // Пожаровзрывобезопасность/Fire and Explosion Safety. 2002. Т. 11. № 5. С. 40–49.
4. *Kholshchevnikov V.V., Samoshyn D.A., Shields T.J., Galushka M.M.* Retrospective review of research on pedestrian flows modelling in Russia and perspectives of its development // Proceedings of the Fourth International Seminar on Fire and Explosion Hazards. Londonderry, UK : University of Ulster, 2003. Pp. 907–916.
5. *Холщевников В.В.* Что моделируем с использованием теории массового обслуживания // Пожаровзрывобезопасность/Fire and Explosion Safety. 2003. Т. 12. № 2. С. 39–40.
6. *Thompson P., Nilsson D., Boyce K., McGrath D.* Evacuation models are running out of time // Fire Safety Journal. 2015. Vol. 78. Pp. 251–261. DOI: 10.1016/j.firesaf.2015.09.004
7. *Thompson P., Nilsson D., Boyce K., McGrath D.* Модели для расчета эвакуации людей устаревают / науч. ред. В.В. Холщевников // Пожаровзрывобезопасность/Fire and Explosion Safety. 2017. Т. 26. № 7. С. 39–55.
8. *Kholshchevnikov V.V., Samoshin D.A.* Parameters of pedestrian flow for modeling purposes // Pedestrian and Evacuation Dynamics 2008. Berlin, Heidelberg : Springer, 2010. Pp. 157–170. DOI: 10.1007/978-3-642-04504-2\_12
9. *Kholshchevnikov V., Serkov B., Kosatchev A., Samoshin D.* Psychophysical relation laws for pedestrian flows parameters // Proceedings of 5th International Symposium “Human Behaviour in Fire”. Cambridge, UK, 2012. Pp. 49–62.
10. *Kholshchevnikov V., Samoshin D.* Modeling and reality of evacuation process // Proceedings of 13th International Conference «Interflam 2013». London, UK : Royal Holloway College, University of London, 2013. Pp. 509–514. URL: [http://www.fireevacuation.ru/files/Interflam2013/InterFlam\\_2013\\_Samoshin\\_paper.pdf](http://www.fireevacuation.ru/files/Interflam2013/InterFlam_2013_Samoshin_paper.pdf)
11. Научная школа. Теория людских потоков // Российская архитектурно-строительная энциклопедия. Т. VII. М. : ВНИИТПИ Госстроя России, 2001. С. 96.
12. *Предтеченский В.М.* О расчете движения людских потоков в зданиях массового назначения // Известия высших учебных заведений. Серия: Строительство и архитектура. 1958. № 7.
13. *Предтеченский В.М., Милинский А.И.* Проектирование зданий с учетом организации движения людских потоков : учеб. пособие для архит. и строит. специальностей вузов. М. : Стройиздат, 1969. 247 с.
14. *Предтеченский В.М., Милинский А.И.* Проектирование зданий с учетом организации движения людских потоков : учеб. пособие для строит. спец. вузов. 2-е изд. перераб. и доп. М. : Стройиздат, 1979. 375 с.
15. *Дувидзон Р.М.* Проектирование спортивных сооружений с учетом движения людских потоков : дис. ... канд. техн. наук. М., 1968. 194 с.
16. *Холщевников В.В.* Оптимизация путей движения людских потоков. Высотные здания : дис. ... канд. техн. наук. М., 1969. 324 с.
17. *Холщевников В.В., Гвоздяков В.С.* Автоматизация проектирования коммуникационных помещений метрополитена // Функциональные и технические проблемы архитектуры. М. : МИСИ, 1977. С. 32–36.

18. *Гвоздяков В.С.* Закономерности движения людских потоков в транспортно-коммуникационных сооружениях : дис. ... канд. техн. наук. М., 1978. 211 с.
19. *Холщевников В.В., Никонов С.А., Шамгунов Р.Н.* Моделирование и анализ движения людских потоков в зданиях различного назначения : учеб. пособие. М. : МИСИ, 1986.
20. *Ford L.R., Fulkerson D.R.* Flows in Networks. Princeton : Princeton University Press, 1962. 212 p. DOI: 10.1515/9781400875184
21. *Холщевников В.В.* Гносеология людских потоков: монография. М. : Академия ГПС МЧС России, 2019. 592 с.
22. *Беляев С.В.* Принципы планировки зал собраний. М.–Л. : Госстройиздат, 1934. 132 с.
23. *Холщевников В.В.* Моделирование зависимостей между параметрами людских потоков // Исследование по основам архитектурного проектирования. Томск : Томский государственный университет, 1983. С. 36–53.
24. *Холщевников В.В.* Людские потоки в зданиях, сооружениях и на территории их комплексов : дис. ... д-ра техн. наук. М., 1983. 486 с.
25. *Холщевников В.В.* Закономерности связи между параметрами людских потоков: диплом № 24-S на открытие в области социальной психологии. М. : Российская академия естественных наук, Международная академия авторов научных открытий и изобретений, Международная ассоциация авторов научных открытий, 2005.
26. *Холщевников В.В., Варшавер А.Б.* Проектирование коммуникационных путей в магазинах: руководство по проектированию магазинов (к главе СНиП II–77–80). М. : ЦНТИ, 1983.
27. *Холщевников В.В., Ройтман М.Я., Башкирцев М.П.* Проектирование эвакуационных путей и выходов: пособие к СНиП 2.09.02–85. М. : Стройиздат, 1986.
28. *Холщевников В.В.* Коммуникационные пути общественных зданий: пособие по проектированию общественных зданий и сооружений (к СНиП 2.08.02–85). М. : Стройиздат, 1986.
29. *Соков А.В., Аносов В.Г., Староверов Н.В., Холщевников В.В.* Проектирование коммуникационных путей общественных зданий. М. : Минобороны, 1989.
30. *Холщевников В.В., Овсянников А.Н., Голубинский А.П., Швейцер И.С.* Проектирование эвакуационных путей в зрелищных зданиях. М. : МИСИ, 1990.
31. *Холщевников В.В., Овсянников А.Н.* Рекомендации по расчету путей эвакуации из зальных помещений и из зданий спортивных корпусов // Проектирование спортивных залов, помещений для физкультурно-оздоровительных занятий и крытых катков с искусственным льдом. М. : Стройиздат, 1991.
32. *Холщевников В.В.* Исследования людских потоков и методология нормирования эвакуации людей из зданий при пожаре: монография. М. : МИПБ МВД России, 1999. 93 с.
33. *Кошмаров Ю.А.* Прогнозирование опасных факторов пожара в помещении. М. : Академия ГПС МВД России, 2000. 118 с.
34. *Овсянников А.С.* Закономерности формирования структуры коммуникационных путей в крытых зрелищных сооружениях : дис. ... канд. техн. наук. М., 1983. 324 с.
35. *Никонов С.А.* Разработка мероприятий по организации эвакуации при пожаре в зданиях с массовым пребыванием людей на основе моделирования движения людских потоков : дис. ... канд. техн. наук. М., 1985.
36. *Айбуев З.С.-А.* Формирование людских потоков на предзаводских территориях крупных промышленных узлов машиностроительного профиля : дис. ... канд. техн. наук. М., 1989. 292 с.
37. *Исаевич И.И.* Разработка основ многовариантного анализа планировочных решений станций и пересадочных узлов метрополитена на основе моделирования закономерностей движения людских потоков : дис. ... канд. техн. наук. М., 1990. 398 с.
38. Программный продукт: Анализ движения людских потоков, вероятность. Версия V 2.0 (ADLPV–2.0). Госстандарт России, № РОСС RU.СП05.Н00220.
39. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ №2011614752 от 17.06.2011 г. Программа FMT 1.0 / Шишов И.А., Холщевников В.В. М. : Федеральная служба по интеллектуальной собственности (Роспатент), 2011.
40. *Kholshchevnikov V.V.* Forecast of human behavior during fire evacuation // Emergency evacuation of people from buildings: Proceedings of International Scientific and Technical Conference. Poland, Warsaw, 2011. P. 139–153.
41. *Бусленко Н.П.* Моделирование сложных систем. 2-е изд. М. : Наука, 1978. 399 с.
42. *Бусленко В.Н.* Автоматизация имитационного моделирования сложных систем. М. : Наука, 1977. 239 с.
43. *Парфененко А.П.* Нормирование требований пожарной безопасности к эвакуационным путям и выходам в зданиях детских дошкольных образовательных учреждений : дис. ... канд. техн. наук. М., 2012. 153 с.
44. *Истратов Р.Н.* Нормирование требований пожарной безопасности к эвакуационным путям и выходам в стационарах социальных учреждений по обслуживанию граждан пожилого возраста : дис. ... канд. техн. наук. М., 2014. 160 с.
45. *Kholshchevnikov V.V., Samoshin D.A., Parfenenko A.P.* Pre-school and school children building evacuation // Proceedings of the Fourth International Symposium on Human Behaviour in Fire. Cambridge, UK, 2009. Pp. 243–254.

46. *Kholshchevnikov V.V., Samoshin D.A., Parfyonenko A.P., Belosokhov I.P.* Study of children evacuation from pre-school education institutions // *Fire and Materials*. 2012. Vol. 36. Issue 5–6. Pp. 349–366. DOI: 10.1002/fam.2152
47. *Kholshchevnikov V.V., Samoshin D.A., Istratov R.N.* The problems of elderly people safe evacuation from senior citizen health care buildings in case of fire // *Proceedings of 5th International Symposium “Human Behaviour in Fire”*. Cambridge, UK, 2012. Pp. 587–593.
48. *Самошин Д.А.* Состав людских потоков и параметры их движения при эвакуации: монография. М. : Академия ГПС МЧС России. 2016. 209 с.
49. *Слюсарев С.В.* Нормирование требований пожарной безопасности к эвакуационным путям и выходам для детей с ограниченными возможностями здоровья в зданиях с их массовым пребыванием : дис. ... канд. техн. наук. М., 2016. 189 с.
50. *Зосимова О.С., Семин А.А., Корольченко Д.А.* Концепции и реалии нормирования коммуникационных путей в зданиях лечебных учреждений // *Пожаровзрывобезопасность/Fire and Explosion Safety*. 2017. Т. 26. № 11. С. 64–80. DOI: 10.18322/PVB.2017.26.11.64-80
51. *Шахуов Т.Ж.* Нормирование требований пожарной безопасности к эвакуационным путям и выходам из зданий мечетей : дис. ... канд. техн. наук. М., 2019. 125 с.
52. *Хасуева З.С.* Нормирование требований пожарной безопасности к эвакуационным путям и выходам учреждений родовспоможения : дис. ... канд. техн. наук. М., 2019. 148 с.
53. *Гурфинкель В.С., Левик Ю.С.* Концепция схемы тела и моторный контроль // *Интеллектуальные процессы и их моделирование. Организация движений*. М. : Наука, 1991. С. 59–105.
54. *Berlucchi G., Aglioti S.* The body in the brain: neural bases of corporeal awareness // *Trends in Neurosciences*. 1997. Vol. 20. Issue 12. Pp. 560–564. DOI: 10.1016/s0166-2236(97)01136-3
55. *Pouget A., Driver J.* Relating unilateral neglect to the neural coding of space // *Current Opinion in Neurobiology*. 2000. Vol. 10. Issue 2. Pp. 242–249. DOI: 10.1016/s0959-4388(00)00077-5
56. *Правдов М.А.* Особенности организации двигательной и познавательной деятельности детей дошкольного возраста. М. : Канон + : Реабилитация, 2006. 184 с.
57. *Анохин П.К.* Принципиальные вопросы общей теории функциональных систем // *Принципы системной организации функций*. М. : Наука, 1973. С. 5–61.
58. *Karkin I.N., Parfenenko A.P.* Flowtech VD – computer-simulation method from evacuation calculation // *Emergency evacuation of people from buildings: Proceedings of International Scientific and Technical Conference*. Poland, Warsaw, 2011. Pp. 111–118.
59. *Холщевников В.В., Парфененко А.П.* Сопоставление различных моделей движения людских потоков и результатов программно-вычислительных комплексов // *Пожаровзрывобезопасность/Fire and Explosion Safety*. 2015. Т. 24. № 5. С. 68–75.
60. *Красавин А.В.* Анализ технического регламента о требованиях пожарной безопасности на предмет наличия в законе коррупциогенных факторов // *Пожарное и спасательное дело*. 2009. № 5. С. 50–57.
61. *Александров Ю.И.* Психофизиология: учебник для вузов. 4-е изд. СПб. : Питер, 2014. 464 с.
62. *Милинский А.И.* Исследование процесса эвакуации зданий массового назначения : дис. ... канд. техн. наук. М., 1951. 178 с.
63. *Эллисон В.А.* Пожары и катастрофы в театрах : (опыт анализа). Л. : Издание автора, 1925–1926.
64. *Fruin J.J.* Pedestrian planning and design. New York : Metropolitan Association of Urban Designers and Environmental Planners, 1971. 206 p.
65. *Копылов В.А.* Исследование параметров движения людей при вынужденной эвакуации : дис. ... канд. техн. наук. М., 1974. 160 с.
66. *Кудрин И.С.* Влияние параметров движения людских потоков при пожаре на объемно-планировочные решения высотных зданий : дис. ... канд. техн. наук. М., 2013. 190 с.
67. *McGrattan K., Hostikka S., Floyd J., Baum H., Rehm R.* Fire Dynamics Simulator (Version 5). Technical Reference Guide. NIST Special Publication 1018-5. Washington : U.S. Government Printing Office, 2007. 86 p. DOI: 10.6028/nist.sp.1018-5
68. *Маркс К.* Капитал. Критика политической экономии. Том 1. Книга I: Процесс производства капитала. 2-е изд. М. : Государственное издательство политической литературы, 1960. С. 770.
69. *Dunning T.J.* Trades’ unions and strikes: their philosophy and intention. London : Published by the author, 1860. 52 p.
70. *Самошин Д.А.* Методологические основы нормирования безопасной эвакуации людей из зданий при пожаре : дис. ... д-ра техн. наук. М., 2017. 357 с.
71. *Kuligowski E.D., Peacock R.D.* A Review of Building Evacuation Models. Technical Note 1471. Washington : U. S. Government Printing Office, 2005. 156 p. DOI: 10.6028/nist.tn.1471
72. *Gwynne S., Galea E.R.* A review of methodologies and critical appraisal of computer models used in the simulation of evacuation from the built environment. Bethesda, Maryland, USA : Society of Fire Protection Engineers, 2004.

73. *Stahl F.I.* Final Report on the “BFIRES/Version 1” computer simulation of emergency egress behavior during fires: calibration and analysis. NBSIR 79-1713. Washington : U.S. Department of Commerce, 1979. 184 p. DOI: 10.6028/nbs.ir.79-1713
74. *Kisko T.M., Francis R.L.* EVACNET+: A computer program to determine optimal building evacuation plans // *Fire Safety Journal*. 1985. Vol. 9. Issue 2. Pp. 211–220. DOI:10.1016/0379-7112(85)90009-8
75. *Fahy R.F.* EXIT 89 – An Evacuation Model for High-Rise Buildings – Model Description and Example Applications // *Fire Safety Science*. 1994. Vol. 4. Pp. 657–668. DOI: 10.3801/iafss.fss.4-657
76. *Ketchell N., Cole S.* The EGRESS code for human movement and behaviour in emergency evacuations // *Engineering for Crowd Safety*. Amsterdam : Elsevier, 1993. Pp. 361–370.
77. *Galea E.R., Galparsoro J.M.P., Pearce J.* A brief description of the EXODUS evacuation model // *Proceedings of the 18th International Conference on Fire Safety*. San Francisco, USA : 1993. Vol. 18. Pp. 149–162.
78. *Pelechano N., Malkawi A.* Comparison of crowd simulation for building evacuation and an alternative approach // *Proceedings: Building Simulation 2007*. Pp. 1514–1521. URL: [http://www.ibpsa.org/proceedings/BS2007/p170\\_final.pdf](http://www.ibpsa.org/proceedings/BS2007/p170_final.pdf)
79. *Klupfel H., Meyer-Konig T.* Characteristics of the PedGo software for crowd movement and egress simulation // *Proceedings of the 2nd International Conference in Pedestrian and Evacuation Dynamics (PED)*. London, UK : University of Greenwich, 2003. Pp. 331–340.
80. *Thompson P.A., Marchant E.W.* A computer model for the evacuation of large building populations // *Fire Safety Journal*. 1995. Vol. 24. Issue 2. Pp. 131–148. DOI: 10.1016/0379-7112(95)00019-p
81. *Thompson P.A.* Developing new techniques for modelling crowd movement : Ph. D. Scotland, University of Edinburgh, Department of Building and Environmental Engineering, 1995.
82. *Cappuccio J.* Pathfinder: a computer-based timed egress simulation // *Fire Protection Engineering*. 2000. Vol. 8. Pp. 11–12.
83. *Oasys MassMotion* // *AEC Magazine*. 25 July 2011. URL: <http://aecmag.com/software-mainmenu-32/445-oasys-massmotion>
84. *Korhonen T., Hostikka S.* Fire dynamics simulator with evacuation: FDS+Evac: Technical Reference and User’s Guide. Finland : VTT, 2009. 91 p. URL: <http://pdfs.semanticscholar.org/f25c/089e83048beefc756b-f17a210f0eff0b8b3.pdf>
85. ISO/TR 16738:2009. Fire-safety engineering — Technical information on methods for evaluating behaviour and movement of people. URL: <https://www.iso.org/obp/ui/#iso:std:iso:tr:16738:ed-1:v1:en>
86. *Ye J., Chen X., Jian N.* Impact analysis of human factors on pedestrian traffic characteristics // *Fire Safety Journal*. 2012. Vol. 52. Pp. 46–54. DOI: 10.1016/j.firesaf.2012.05.003
87. *Soria S.A., Josens R., Parisi D.R.* Experimental evidence of the «Faster is Slower» effect in the evacuation of ants // *Safety Science*. 2012. Vol.50. Issue 7. Pp. 1584–1588. DOI: 10.1016/j.ssci.2012.03.010
88. *Choi J., Kim S., Kim S., Jin M., Kim Y., Kim J.* Pedestrian conflicts, pedestrian comfort levels, and current pedestrian levels of service // *Pedestrian and Evacuation Dynamics*. Cham : Springer, 2014. Pp. 1353–1363. DOI: 10.1007/978-3-319-02447-9\_112
89. *World Population Ageing 2013*. Department of economic and social affairs. Population division. ST/ESA/SER.A/348. New York : United Nations, 2013. URL: <http://www.un.org/en/development/desa/population/publications/pdf/ageing/WorldPopulationAgeing2013.pdf>
90. *The 2015 Ageing Report: Economic and budgetary projections for the 28 EU Member States (2013–2060)*. Brussels : European Commission, 2015. 424 p. DOI: 10.2765/877631
91. *Levy J., Segal L.M., Thomas K., Laurent R., Lang A., Rayburn J.* F as in Fat: how obesity threatens America’s future 2012. USA : Trust for America’s Health, Robert Wood Johnson Foundation, 2013.
92. *World health statistics (NLM classification: WA 900.1)*. Geneva : World Health Organization Press, 2014. 178 p.
93. *Obesity and overweight* // *World Health Organization. Fact Sheet*. 2015. № 311. URL: <http://www.who.int/mediacentre/factsheets/fs311/en/>
94. *Kuligowski E.D., Peacock R.D., Reneke P.A., Wiess E., Hagwood C.R., Overholt K.J. et al.* Movement on stairs during building evacuations. NIST Technical Note 1839. Washington : U.S. Department of Commerce, 2015. 213 p. DOI: 10.6028/NIST.TN.1839
95. *Report of the World Commission on Environment and Development: Our Common Future*. URL: <http://www.un-documents.net/wced-ocf.htm>
96. *OECD. Obesity Update 2012*. URL: <http://www.oecd.org/health/49716427.pdf>
97. *Бэр К.Е.* Зависимость нашего представления о мире от длины нашего момента // *Доклады на научных собраниях*. СПб., 1864.
98. *Кейдель В.Д.* Физиология органов чувств. Часть I. Общая физиология органов чувств и зрительная система. М. : Медицина. 1975.

99. Pauls J.L. Building evacuation: research findings and recommendations // Fires and Human Behaviour. New York : John Wiley & Sons, 1980. Pp. 251–275.
100. Kimura K., Ihara S. A survey for the state of crowds streaming in building // Transaction of the Institute of Japanese Architects (Annual Meeting). 1937. № 5. Pp. 307–316. (jap.).
101. Navin F.P.D., Wheeler R.J. Pedestrian flow characteristics // Traffic Engineering. 1969. Vol. 39. Issue 9. Pp. 30–36.
102. Togawa K. Study on fire escapes basing on the observations of multitude current // Japanese Building Research Institute Report No. 14. 1955. Pp. 1–40. (jap.).

## REFERENCES

1. Kholshchevnikov V.V., Predtechenskiy V.M. Analysis and modeling the relationships between pedestrian flow parameters. *International Council for Building. Report No. 14/86/37*. 1986; 14.
2. Kholshchevnikov V.V. Foot traffic flows: actual observations, experiments and theory. *Fire Bridge: Proceedings of International Conference. Northern Ireland, University of Ulster, 2–6 September 2000*. 20.
3. Kholshchevnikov V.V., Samoshin D.A., Galushka N.N. Review of computer programs of modeling the evacuation of buildings and constructions. *Pozharovzryvobezopasnost/Fire and Explosion Safety*. 2002; 11(5):40-49. (rus.).
4. Kholshchevnikov V.V., Samoshyn D.A., Shields T.J., Galushka M.M. Retrospective review of research on pedestrian flows modelling in Russia and perspectives of its development. *Proceedings of the Fourth International Seminar on Fire and Explosion Hazards*. Londonderry, UK, University of Ulster, 2003; 907-916.
5. Kholshchevnikov V.V. What is modelled with the use of the theory of mass service. *Pozharovzryvobezopasnost/Fire and Explosion Safety*. 2003; 12(2):39-40. (rus.).
6. Thompson P., Nilsson D., Boyce K., McGrath D. Evacuation models are running out of time. *Fire Safety Journal*. 2015; 78:251-261. DOI: 10.1016/j.firesaf.2015.09.004
7. Thompson P., Nilsson D., Boyce K., McGrath D. Evacuation models are running out of time. Under scientific ed. V.V. Kholshchevnikov. *Pozharovzryvobezopasnost/Fire and Explosion Safety*. 2017; 26(7):39-55. (rus.).
8. Kholshchevnikov V.V., Samoshin D.A. Parameters of pedestrian flow for modeling purposes. *Pedestrian and Evacuation Dynamics 2008*. Berlin, Heidelberg, Springer, 2010; 157-170. DOI: 10.1007/978-3-642-04504-2\_12
9. Kholshchevnikov V., Serkov B., Kosatchev A., Samoshin D. Psychophysical relation laws for pedestrian flows parameters. *Proceedings of 5th International Symposium "Human Behaviour in Fire"*. Cambridge, UK, 2012; 49-62.
10. Kholshchevnikov V., Samoshin D. Modeling and reality of evacuation process. *Proceedings of 13th International Conference "Interflam 2013"*. London, UK, Royal Holloway College, University of London, 2013; 509-514. URL: [http://www.fireevacuation.ru/files/Interflam2013/InterFlam\\_2013\\_Samoshin\\_paper.pdf](http://www.fireevacuation.ru/files/Interflam2013/InterFlam_2013_Samoshin_paper.pdf)
11. Scientific school. The theory of human flows. *Russian Architectural and Construction Encyclopedia. Vol. VII*. Moscow, VNIINTPI Gosstroy of Russia, 2001; 96. (rus.).
12. Predtechenskiy V.M. About the calculation of human flows traffic in general public buildings. *News of Higher Educational Institutions. Series: Construction and Architecture*. 1958, 7. (rus.).
13. Predtechenskiy V.M., Milinskiy A.I. *Building design consider the organization of human flows traffic: manual for architectural and construction specialties*. Moscow, Stroyizdat Publ., 1969; 247. (rus.).
14. Predtechenskiy V.M., Milinskiy A.I. *Building design consider the organization of human flows traffic: manual for construction specialties*. 2nd ed. Moscow, Stroyizdat Publ., 1979; 375. (rus.).
15. Duvidzon R.M. *Design of sports facilities consider human flows traffic : dis. ... cand. tech. sciences*. Moscow, 1968; 194. (rus.).
16. Kholshchevnikov V.V. *Optimization of the traffic ways of human flows. High-rise buildings : dis. ... cand. tech. sciences*. Moscow, 1969; 324. (rus.).
17. Kholshchevnikov V.V., Gvozdyakov V.S. Automation of the design of metro communication rooms. *Functional and Technical Problems of Architecture*. Moscow, MISI Publ., 1977; 32-36. (rus.).
18. Gvozdyakov V.S. *Patterns of human flows traffic in transport and communication facilities : dis. ... cand. tech. sciences*. Moscow, 1978; 211. (rus.).
19. Kholshchevnikov V.V., Nikonov S.A., Shamgunov R.N. *Modeling and analysis of human flows traffic in buildings for various purposes*. Moscow, MISI Publ., 1986. (rus.).
20. Ford L.R., Fulkerson D.R. *Flows in networks*. Princeton, Princeton University Press, 1962; 212. DOI: 10.1515/9781400875184
21. Kholshchevnikov V.V. *Epistemology of human flows: monograph*. Moscow, Academy of State Fire Service of EMERCOM of Russia Publ., 2019; 592. (rus.).
22. Belyaev S.V. *Principles of planning a meeting room*. Moscow, Leningrad, Gosstroyizdat, 1934; 132. (rus.).
23. Kholshchevnikov V.V. Modeling the dependencies between the parameters of human flows. *Research on the Basics of Architectural Design*. Tomsk, Tomsk State University Publ., 1983; 36-53. (rus.).

24. Kholshchevnikov V.V. *Human flows in buildings, structures and on the territory of their complexes : dis. ... dr. tech. sciences.* Moscow, 1983; 486. (rus.).
25. Kholshchevnikov V.V. *Regularities of the connection between the parameters of human flows: diploma No. 24-S for discovery in the field of social psychology.* Moscow, Russian Academy of Natural Sciences, International Academy of Authors of Scientific Discoveries and Inventions, International Association of Authors of Scientific Discoveries Publ., 2005. (rus.).
26. Kholshchevnikov V.V., Varshaver A.B. *Designing communication paths in stores: a guide for designing stores (to the chapter of SNiP II-77-80).* Moscow, TsNTI Publ., 1983. (rus.).
27. Kholshchevnikov V.V., Roytman M.Ya., Bashkirtsev M.P. *Design of evacuation paths and exits: a guide for SNiP 2.09.02-85.* Moscow, Stroyizdat Publ., 1986. (rus.).
28. Kholshchevnikov V.V. *Communication ways of public buildings: a guide for the design of public buildings and structures (to SNiP 2.08.02-85).* Moscow, Stroyizdat Publ., 1986. (rus.).
29. Sokov A.V., Anosov V.G., Staroverov N.V., Kholshchevnikov V.V. *Design of communication paths of public buildings.* Moscow, Ministry of Defense Publ., 1989. (rus.).
30. Kholshchevnikov V.V., Ovsyannikov A.N., Golubinskiy A.P., Shveytser I.S. *Design of emergency paths in entertainment buildings.* Moscow, MISI Publ., 1990. (rus.).
31. Kholshchevnikov V.V., Ovsyannikov A.N. Recommendations on the calculation of evacuation paths from halls and sport buildings. *Designing gyms, rooms for fitness classes and indoor ice rinks with artificial ice.* Moscow, Stroyizdat Publ., 1991. (rus.).
32. Kholshchevnikov V.V. *Research of human flows and valuation methodology evacuation of people from buildings in case of fire: monograph.* Moscow, Moscow Institute of Fire Safety of the Ministry of Internal Affairs Publ., 1999; 93. (rus.).
33. Koshmarov Yu.A. *Prediction of the hazards of fire in the room.* Moscow, Academy of State Fire Service of the Ministry of Internal Affairs Publ., 2000; 118. (rus.).
34. Ovsyannikov A.S. *Patterns of formation of the structure of communication paths in indoor entertainment facilities : dis. ... cand. tech. sciences.* Moscow, 1983; 324. (rus.).
35. Nikonov S.A. *Development of measures for the organization of evacuation in case of fire in buildings with a massive stay of people based on human flows traffic simulation : dis. ... cand. tech. sciences.* Moscow, 1985. (rus.).
36. Aybuev Z.S.-A. *The formation of human flows on pre-factory territories of large industrial units of engineering profile : dis. ... cand. tech. sciences.* Moscow, 1989; 292. (rus.).
37. Isaevich I.I. *Development of the foundations of multivariate analysis of planning station decisions and subway interchange units based on modeling patterns of human flows traffic : dis. ... cand. tech. sciences.* Moscow, 1990; 398. (rus.).
38. Software product: analysis of foot traffic, the probability. Version V2.0 (ADLPV-2.0). State Standard of Russia, No. ROSS RU.SP05.N00220. (rus.).
39. Certificate of state registration of the computer program No. 2011614752. Program FMT 1.0 / Shishov I.A., Kholshchevnikov V.V. Moscow, Federal Service for Intellectual Property (Rospatent), 2011. (rus.).
40. Kholshchevnikov V.V. Forecast of human behavior during fire evacuation. *Emergency evacuation of people from buildings: Proceedings of International Scientific and Technical Conference.* Poland, Warsaw, 2011; 139-153.
41. Buslenko N.P. *Modeling complex systems.* 2nd ed. Moscow, Nauka Publ., 1978; 399. (rus.).
42. Buslenko V.N. *Automation of simulation of complex systems.* Moscow, Nauka Publ., 1977; 239. (rus.).
43. Parfenenko A.P. *Rationing of fire safety requirements for evacuation paths and exits in buildings of preschool educational institutions : dis. ... cand. tech. sciences.* Moscow, 2012; 153. (rus.).
44. Istratov R.N. *Rationing of fire safety requirements for evacuation paths and exits in hospitals of social institutions for servicing elderly citizens : dis. ... cand. tech. sciences.* Moscow, 2014; 160. (rus.).
45. Kholshchevnikov V.V., Samoshin D.A., Parfenenko A.P. Pre-school and school children building evacuation. *Proceedings of the Fourth International Symposium on Human Behaviour in Fire.* Cambridge, UK, 2009; 243-254.
46. Kholshchevnikov V.V., Samoshin D.A., Parfyonenko A.P., Belosokhov I.P. Study of children evacuation from pre-school education institutions. *Fire and Materials.* 2012; 36(5-6):349-366. DOI: 10.1002/fam.2152
47. Kholshchevnikov V.V., Samoshin D.A., Istratov R.N. The problems of elderly people safe evacuation from senior citizen health care buildings in case of fire. *Proceedings of 5th International Symposium "Human Behaviour in Fire".* Cambridge, UK, 2012; 587-593.
48. Samoshin D.A. *Composition of human flows and parameters of their movement during evacuation: monograph.* Moscow, Academy of State Fire Service of EMERCOM of Russia Publ., 2016; 209. (rus.).
49. Slyusarev S.V. *Standardization of fire safety requirements for evacuation paths and exits for children with disabilities in buildings with massive stay : dis. ... cand. tech. sciences.* Moscow, 2016; 189. (rus.).

50. Zosimova O.S., Semin A.A., Korolchenko D.A. Concepts and realities of rationing of communication paths in the buildings of medical institutions. *Pozharovzryvobezопасnost/Fire and Explosion Safety*. 2017; 26(11):64-80. DOI: 10.18322/PVB.2017.26.11.64-80 (rus.).
51. Shakhov T.Zh. *Standardization of fire safety requirements for evacuation paths and exits from mosque buildings : dis. ... cand. tech. sciences*. Moscow, 2019; 125. (rus.).
52. Khasueva Z.S. *Standardization of fire safety requirements for evacuation paths and exits of obstetric institutions : dis. ... cand. tech. sciences*. Moscow, 2019; 148. (rus.).
53. Gurfinkel V.S., Levik Yu.S. The concept of body patterns and motor control. *Intellectual processes and their modeling. Organization of movements*. Moscow, Nauka Publ., 1991; 59-105. (rus.).
54. Berlucchi G., Aglioti S. The body in the brain: neural bases of corporeal awareness. *Trends in Neurosciences*. 1997; 20(12):560-564. DOI: 10.1016/s0166-2236(97)01136-3
55. Pouget A., Driver J. Relating unilateral neglect to the neural coding of space. *Current Opinion in Neurobiology*. 2000; 10(2):242-249. DOI: 10.1016/s0959-4388(00)00077-5
56. Pravdov M.A. *Features of the organization of motor and cognitive activity of preschool children*. Moscow, Kanon +, Rehabilitation Publ., 2006; 184. (rus.).
57. Anokhin P.K. Principled questions of the general theory of functional systems. *Principles of system organization of functions*. Moscow, Nauka Publ., 1973; 5-61. (rus.).
58. Karkin I.N., Parfenenko A.P. Flowtech VD – computer-simulation method from evacuation calculation. *Emergency evacuation of people from buildings: Proceedings of International Scientific and Technical Conference*. Poland, Warsaw, 2011; 111-118.
59. Kholshchevnikov V.V., Parfenenko A.P. Comparison of different models of the movement of human flows and results of program computer systems. *Pozharovzryvobezопасnost/Fire and Explosion Safety*. 2015; 24(5):68-75. (rus.).
60. Krasavin A.V. Analysis of technical regulation on fire safety requirements for corruption-related factors in the law. *Fire and Rescue*. 2009; 5:50-57. (rus.).
61. Aleksandrov Yu.I. *Psychophysiology: a textbook for universities*. 4th ed. Saint Petersburg, Piter Publ., 2014; 464. (rus.).
62. Milinskiy A.I. *Research of the evacuation of buildings for public use : dis. ... cand. tech. sciences*. Moscow, 1951; 178. (rus.).
63. Ellison V.A. *Fires and disasters in theaters : (experience of analysis)*. Leningrad, Published by the author, 1925-1926. (rus.).
64. Fruin J.J. *Pedestrian planning and design*. New York, Metropolitan Association of Urban Designers and Environmental Planners, 1971; 206.
65. Kopylov V.A. *The study of motion parameters of people during emergency evacuation : dis. ... cand. tech. sciences*. Moscow, 1974; 160. (rus.).
66. Kudrin I.S. *Influence of parameters of people flows traffic during a fire on the space-planning decisions of high-rise buildings : dis. ... cand. tech. sciences*. Moscow, 2013; 190. (rus.).
67. McGrattan K., Hostikka S., Floyd J., Baum H., Rehm R. *Fire Dynamics Simulator (Version 5). Technical Reference Guide. NIST Special Publication 1018-5*. Washington, U.S. Government Printing Office, 2007; 86. DOI: 10.6028/nist.sp.1018-5
68. Marks K. *Capital. A Critique of Political Economy. Volume I. Book One: The Process of Production of Capital. 2nd ed.* Moscow, State Publishing House of Political Literature, 1960; 770.
69. Dunning T.J. *Trades' unions and strikes: their philosophy and intention*. London, Published by the author, 1860; 52.
70. Samoshin D.A. *Methodological basics of regulation of safe people evacuation from buildings in case of fire : dis. ... dr. tech. sciences*. Moscow, 2017; 357. (rus.).
71. Kuligowski E.D., Peacock R.D. *A Review of Building Evacuation Models. Technical Note 1471*. Washington, U. S. Government Printing Office, 2005; 156. DOI: 10.6028/nist.tn.1471
72. Gwynne S., Galea E.R. *A review of methodologies and critical appraisal of computer models used in the simulation of evacuation from the built environment*. Bethesda, Maryland, USA, Society of Fire Protection Engineers, 2004.
73. Stahl F.I. *Final Report on the "BFIRES/Version 1" computer simulation of emergency egress behavior during fires: calibration and analysis. NBSIR 79-1713*. Washington, U.S. Department of Commerce, 1979; 184. DOI: 10.6028/nbs.ir.79-1713
74. Kisko T.M., Francis R.L. EVACNET+: A computer program to determine optimal building evacuation plans. *Fire Safety Journal*. 1985; 9(2):211-220. DOI:10.1016/0379-7112(85)90009-8
75. Fahy R.F. EXIT 89 – An Evacuation Model for High-Rise Buildings – Model Description and Example Applications. *Fire Safety Science*. 1994; 4:657-668. DOI: 10.3801/iafss.fss.4-657
76. Ketchell N., Cole S. The EGRESS code for human movement and behaviour in emergency evacuations. *Engineering for Crowd Safety*. Amsterdam, Elsevier, 1993; 361-370.

77. Galea E.R., Galparsoro J.M.P., Pearce J. A brief description of the EXODUS evacuation model. *Proceedings of the 18th International Conference on Fire Safety*. San Francisco, USA, 1993; 18:149-162.
78. Pelechano N., Malkawi A. Comparison of crowd simulation for building evacuation and an alternative approach. *Proceedings: Building Simulation 2007*. 1514-1521. URL: [http://www.ibpsa.org/proceedings/BS2007/p170\\_final.pdf](http://www.ibpsa.org/proceedings/BS2007/p170_final.pdf)
79. Klupfel H., Meyer-Konig T. Characteristics of the PedGo software for crowd movement and egress simulation. *Proceedings of the 2nd International Conference in Pedestrian and Evacuation Dynamics (PED)*. London, UK, University of Greenwich, 2003; 331-340.
80. Thompson P.A., Marchant E.W. A computer model for the evacuation of large building populations. *Fire Safety Journal*. 1995; 24(2):131-148. DOI: 10.1016/0379-7112(95)00019-p
81. Thompson P.A. *Developing new techniques for modelling crowd movement : Ph. D.* Scotland, University of Edinburgh, Department of Building and Environmental Engineering, 1995.
82. Cappuccio J. Pathfinder: a computer-based timed egress simulation. *Fire Protection Engineering*. 2000; 8:11-12.
83. OasysMassMotion. *AEC Magazine*. 25 July 2011. URL: <http://aecmag.com/software-mainmenu-32/445-oasys-mass-motion>
84. Korhonen T., Hostikka S. *Fire Dynamics Simulator with Evacuation: FDS+Evac: Technical Reference and User's Guide*. Finland, VTT, 2009; 91. URL: <http://pdfs.semanticscholar.org/f25c/089e83048beefc756b-f17a210f0eff0b8b3.pdf>
85. ISO/TR 16738:2009. Fire-safety engineering – Technical information on methods for evaluating behaviour and movement of people. URL: <https://www.iso.org/obp/ui/#iso:std:iso:tr:16738:ed-1:v1:en>
86. Ye J., Chen X., Jian N. Impact analysis of human factors on pedestrian traffic characteristics. *Fire Safety Journal*. 2012; 52:46-54. DOI: 10.1016/j.firesaf.2012.05.003
87. Soria S.A., Josens R., Parisi D.R. Experimental evidence of the “Faster is Slower” effect in the evacuation of ants. *Safety Science*. 2012; 50(7):1584-1588. DOI: 10.1016/j.ssci.2012.03.010
88. Choi J., Kim S., Kim S., Jin M., Kim Y., Kim J. Pedestrian Conflicts, Pedestrian Comfort Levels, and Current Pedestrian Levels of Service. *Pedestrian and Evacuation Dynamics*. Cham, Springer, 2014; 1353-1363. DOI: 10.1007/978-3-319-02447-9\_112
89. *World Population Ageing 2013. Department of Economic and Social Affairs. Population Division. ST/ESA/SER.A/348*. New York, United Nations, 2013. URL: <http://www.un.org/en/development/desa/population/publications/pdf/ageing/WorldPopulationAgeing2013.pdf>
90. *The 2015 Ageing Report: Economic and budgetary projections for the 28 EU Member States (2013–2060)*. Brussels, European Commission, 2015; 424. DOI: 10.2765/877631
91. Levy J., Segal L.M., Thomas K., Laurent R., Lang A., Rayburn J. *F as in Fat: How Obesity Threatens America's Future 2012*. USA, Trust for America's Health, Robert Wood Johnson Foundation, 2013.
92. *World health statistics (NLM classification: WA 900.1)*. Geneva, World Health Organization Press, 2014; 178.
93. Obesity and overweight. *World Health Organization. Fact Sheet*. 2015; 311. URL: <http://www.who.int/mediacentre/factsheets/fs311/en/>
94. Kuligowski E.D., Peacock R.D., Reneke P.A., Wiess E., Hagwood C.R., Overholt K.J. et al. *Movement on Stairs During Building Evacuations. NIST Technical Note 1839*. Washington, U.S. Department of Commerce, 2015; 213. DOI: 10.6028/NIST.TN.1839
95. *Report of the world commission on environment and development: our common future*. URL: <http://www.un-documents.net/wced-ocf.htm>
96. *OECD. Obesity Update 2012*. URL: <http://www.oecd.org/health/49716427.pdf>
97. Ber K.E. Dependence of our view of the world on the length of our moment. *Reports at Scientific Meetings*. Saint Petersburg, 1864. (rus.).
98. Keidel W.D. *The physiology of the senses. Part I. General physiology of the sense organs and visual system*. Moscow, Medicine Publ., 1975.
99. Pauls J.L. Building evacuation: research findings and recommendations. *Fires and Human Behaviour*. New York, John Wiley & Sons, 1980; 251-275.
100. Kimura K., Ihara S. A survey for the state of crowds streaming in building. *Transaction of the Institute of Japanese Architects (Annual Meeting)*. 1937; 5:307-316. (jap.).
101. Navin F.P.D., Wheeler R.J. Pedestrian flow characteristics. *Traffic Engineering*. 1969; 39(9):30-36.
102. Togawa K. Study on fire escapes basing on the observations of multitude current. *Japanese Building Research Institute Report No. 14*. 1955; 1-40. (jap.).

Поступила 27.04.2020, после доработки 18.05.2020; принята к публикации 25.05.2020  
 Received April 27, 2020; Received in revised form May 18, 2020; Accepted May 25, 2020

**Информация об авторах**

**ХОЛЩЕВНИКОВ Валерий Васильевич**, д-р техн. наук, профессор кафедры пожарной безопасности в строительстве, Академия Государственной противопожарной службы МЧС России; главный научный сотрудник, Институт комплексной безопасности в строительстве, Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет; эксперт, Научно-исследовательский институт «Республиканский исследовательский научно-консультационный центр экспертизы», Москва, Российская Федерация; Scopus Author ID: 57194448578; ResearcherID: AAP-2971-2020; ORCID: 0000-0001-8472-7749; e-mail: reglament2004@mail.ru

**ПАРФЕНЕНКО Александр Павлович**, канд. техн. наук, заместитель директора, Институт комплексной безопасности в строительстве; доцент кафедры комплексной безопасности в строительстве, Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет, Москва, Российская Федерация; Scopus Author ID: 57214086032; ResearcherID: AAP-2933-2020; ORCID: 0000-0001-7490-8773; e-mail: parf01@inbox.ru

**Information about the authors**

**Valeriy V. KHOLSHCHEVNIKOV**, Dr. Sci. (Eng.), Professor of Fire Safety in Construction Department, Academy of the State Fire Service of Emercom of Russia; Chief Researcher of Institute of Integrated Safety in Construction, National Research Moscow State University of Civil Engineering; Expert of Scientific Research Institute “Federal Research Centre for Projects Evaluation and Consulting Services”; Moscow, Russian Federation; Scopus Author ID: 57194448578; ResearcherID: AAP-2971-2020; ORCID: 0000-0001-8472-7749; e-mail: reglament2004@mail.ru

**Aleksander P. PARFENENKO**, Cand. Sci. (Eng.), Deputy Head of Institute of Integrated Safety in Construction, Associate Professor of Department of Integrated Safety in Civil Engineering, National Research Moscow State University of Civil Engineering; Moscow, Russian Federation; Scopus Author ID: 57214086032; ResearcherID: AAP-2933-2020; ORCID: 0000-0001-7490-8773; e-mail: parf01@inbox.ru

## Оценка эффективности применения видеонаблюдения в системах противопожарной защиты

© А.Н. Членов✉, Т.А. Буцынская

Академия Государственной противопожарной службы МЧС России (Россия, 129366, г. Москва, ул. Бориса Галушкина, 4)

### АННОТАЦИЯ

**Введение.** Актуальность темы, раскрытой в статье, заключается в необходимости повышения эффективности обнаружения пожара. Одно из современных направлений решения данной задачи состоит в применении видеотехнологий. Целью статьи является разработка методики оценки эффективности применения видеонаблюдения в системе противопожарной защиты на основе сформированной математической модели.

**Методы исследования.** Для формирования математической модели использована теория пожарных рисков. Потенциальный риск необнаружения пожара введен как количественная мера возможности возникновения необнаруженного пожара на объекте защиты, развития и реализации его последствий для людей и материальных ценностей. Он рассчитывается как произведение максимальной вероятности возникновения пожара и вероятности его необнаружения используемыми техническими средствами и системами сигнализации. Эффективность применения видеонаблюдения в системе противопожарной защиты определяется на основе соответствия комплексного показателя риска необнаружения пожара допустимому значению.

**Результаты исследования.** Рассмотрены возможности повышения эффективности обнаружения пожара за счет применения видеотехнологий. Снижения риска необнаружения пожара можно достичь благодаря использованию пожарных извещателей с видеоканалом, обеспечивающих уменьшение времени достоверного обнаружения пожара. Вероятность достоверного обнаружения является важным параметром извещателя при его работе в составе пожарной сигнализации и характеризует степень выполнения его основной функции. Главными путями повышения эффективности обнаружения пожара являются совершенствование пожарных извещателей с видеоканалом, совместное использование пожарного видеодетектора и других устройств обнаружения, например, автоматических мультикритериальных извещателей, тепловизора, а также применение средств фото- и видеофиксации в системах централизованного наблюдения.

**Выводы.** Предложенная методика оценки эффективности применения видеонаблюдения в системах противопожарной защиты может быть использована для обоснования параметров установленных на объекте технических средств (систем) пожарной сигнализации и мер пожарной профилактики.

**Ключевые слова:** пожарная сигнализация; риск необнаружения пожара; вероятность достоверного обнаружения; пожарный извещатель с видеоканалом; пожарная видеоаналитика; передача видеоинформации

**Для цитирования:** Членов А.Н., Буцынская Т.А. Оценка эффективности применения видеонаблюдения в системах противопожарной защиты // Пожаровзрывобезопасность/Fire and Explosion Safety. 2020. Т. 29. № 3. С. 95–102. DOI: 10.22227/PVB.2020.29.03.95-102

✉ Членов Анатолий Николаевич, e-mail: chlenov@mail.ru

## Performance evaluation of video surveillance in fire-fighting systems

© Anatoliy N. Chlenov✉, Tatiana A. Butcinskaya

State Fire Academy of Emercom of Russia (Borisa Galushkina St., 4, Moscow, 129366, Russian Federation)

### ABSTRACT

**Introduction.** Rationale of the topic of this article is the need to improve the effectiveness of fire detection. One of the modern solutions to this problem is the use of video technology. The article is aimed at developing a method to assess the effectiveness of video surveillance in the fire protection system on the basis of the formed mathematical model.

**Methods of Research.** The fire risks theory is used for formation of mathematical model. The potential fire detection risk is introduced as a quantitative measure of the possibility of undetected fire occurrence at the protected facility, development and implementation of its consequences for people and material valuables. It is calculated as the product of the maximum probability of fire by the probability of its non-detection by the technical means and alarm systems used. The efficiency of video surveillance use in the fire protection system is determined on the basis of compliance of the complex risk index of fire non-detection with the permissible value.

**Research Results.** The possibilities of increasing the efficiency of fire detection through the use of video technology are considered. Reducing the fire detection risk can be achieved by using video channel fire detectors that reduce the time it takes

to reliably detect a fire. The probability of reliable detection is an important parameter of the detector during its operation in the fire alarm system and characterizes the degree of performance of its main function. The main ways to improve the efficiency of fire detection are the improvement of fire detectors with video channel, the joint use of fire video detectors and other detection devices, such as automatic multi-criteria detectors, thermal imaging camera, as well as the use of photo and video in centralized surveillance systems.

**Conclusions.** The offered method of estimation of efficiency of application of video surveillance in fire protection systems can be used for a substantiation of parameters of technical means (systems) of the fire alarm system and passive fire-fighting measures established on the facility.

**Keywords:** fire alarm; fire detection risk; probability of reliable detection; fire detector with video channel; fire video analytics; video information transfer

**For citation:** Chlenov A.N., Butcinskaya T.A. Performance evaluation of video surveillance in fire-fighting systems. *Pozharovzryvobezopasnost/Fire and Explosion Safety*. 2020; 29(3):95-102. DOI: 10.22227/PVB.2020.29.03.95-102 (rus.).

✉ Anatoliy Nikolaevich Chlenov, e-mail; chlenov@mail.ru

## Введение

Пожарная безопасность защищаемого объекта определяется возможностью надежного обнаружения возгорания. Некачественная работа пожарной сигнализации может привести к гибели людей, недопустимому материальному и иному ущербу независимо от результата последующего тушения пожара.

Таким образом, потенциальный риск необнаружения пожара (НОП) можно определить как количественную меру возможности возникновения необнаруженного пожара на объекте защиты, развития и реализации его последствий для людей и материальных ценностей [1]. Опасность может быть ликвидирована, если своевременное обнаружение пожара произойдет менее чем за то время, которое необходимо для развития опасных факторов пожара до критических значений [2]. Это является необходимым условием обеспечения противопожарной защиты, формируемой на объекте комплексной системы безопасности (КСБ).

Целью настоящей статьи является разработка методики оценки эффективности применения видеонаблюдения в системе противопожарной защиты на основе сформированной математической модели.

Результаты, полученные при определении риска НОП, могут быть использованы при проектировании КСБ для обоснования параметров применяемых технических средств и мер пожарной профилактики.

## Методы исследования

Характеристикой соответствия риска НОП допустимому значению является неравенство [1, 3]:

$$Q_{\text{ноп}} \leq Q_{\text{ноп}}^{\text{н}} \quad (1)$$

где  $Q_{\text{ноп}}$  — расчетная величина риска НОП;

$Q_{\text{ноп}}^{\text{н}}$  — предельное допустимое значение риска НОП.

Следует отметить, что в настоящее время официально принятого понятия риска НОП, как и его допустимого уровня, не установлено.

Расчетная величина риска НОП  $Q_{\text{ноп}i}$  для  $i$ -го сценария возникновения пожара на конкретном объекте может быть определена с помощью выражения:

$$Q_{\text{ноп}i} = P_{\text{п}i} (1 - P_{\text{до}i}) (1 - P_{\text{дл}i}), \quad (2)$$

где  $P_{\text{п}i}$  — оценка вероятности пожара на защищаемом объекте для  $i$ -го сценария, на основании статистических данных может быть определена как частота возникновения пожара в течение установленного периода времени [1];

$P_{\text{до}i}$  — оценка вероятности достоверного обнаружения возгорания пожарной сигнализацией для  $i$ -го сценария;

$P_{\text{дл}i}$  — оценка вероятности противодействия НОП дополнительных подсистем, входящих в КСБ объекта и реагирующих на факторы пожара, для  $i$ -го сценария.

Для типового состава КСБ в соответствии с ГОСТ Р 53704–2009 «Системы безопасности комплексные и интегрированные. Общие технические требования» в качестве дополнительной системы, формирующей  $P_{\text{дл}i}$ , может выступать подсистема видеонаблюдения и контроля, выполняющая, в качестве основной, функцию технологического контроля или охранного телевидения [4, 5]. Не следует исключать возможное положительное влияние на  $P_{\text{дл}i}$  и других систем безопасности промышленного объекта.

Все возможные сценарии  $S_i$  НОП составляют конечное множество  $H$ , состоящее из  $k$  членов [3]:

$$H \subseteq (S_1, S_2, \dots, S_p, \dots, S_k). \quad (3)$$

Теоретически случайные события реализации возможных сценариев НОП можно считать независимыми, несовместными и образующими полную группу случайных событий.

Для конкретного объекта  $M$  при учете его конструктивных особенностей, а также имеющейся информации о вероятности реализации конкретных сценариев количество членов множества  $H$  может быть сокращено [3]:

$$H_M \subseteq (S_1, S_2, \dots, S_i, \dots, S_l), l < k. \quad (4)$$

При формировании противопожарной защиты объекта  $M$  условие (1) должно быть выполнено для каждого возможного сценария НОП:

$$Q_{\text{ноп}i} \leq Q_{\text{ноп}}^M, i = 1, \dots, l. \quad (5)$$

При расчете должен выбираться тот сценарий развития пожара, при котором достигается худшее (максимальное) значение риска НОП. Поэтому в дальнейшем индекс « $i$ » можно не указывать.

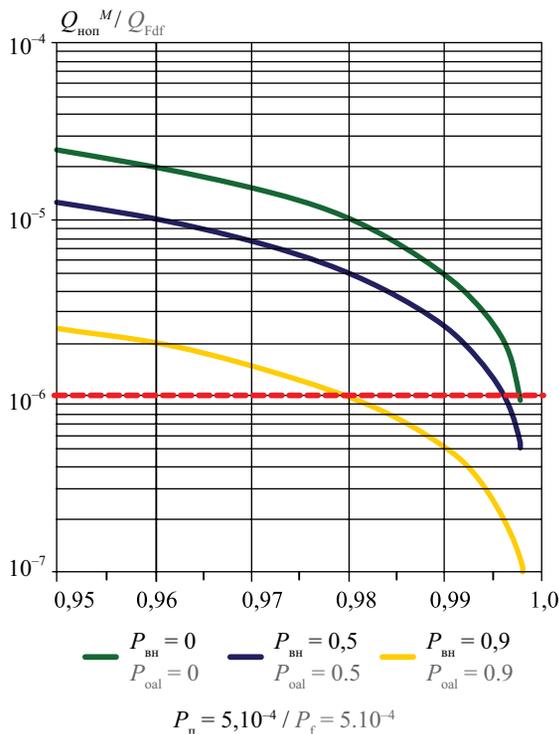
Если для объекта  $M$  максимальное значение риска НОП из всех возможных сценариев будет  $Q_{\text{ноп}}^M$ , то условие (5) можно записать в виде [3]:

$$Q_{\text{ноп}}^M \leq Q_{\text{ноп}}^d. \quad (6)$$

Таким образом, с учетом (3), условие эффективности обнаружения пожара будет

$$P_{\text{п}}(1 - P_{\text{до}})(1 - P_{\text{вн}}) \leq Q_{\text{ноп}}^d. \quad (7)$$

Графическое представление реализации условия (7) для конкретных выбранных значений параметров показано на рис. 1.



**Рис. 1.** Зависимость риска НОП от вероятности достоверного обнаружения пожара  $P_{\text{до}}$

**Fig. 1.** Dependence of the FD (fire detection) risk on the likelihood of reliable fire detection  $D_{\text{re}}$

Из графиков на рис. 1 следует, что практическое снижение уровня риска НОП до допустимого уровня может быть достигнуто увеличением вероятности достоверного обнаружения системой пожарной сигнализации  $P_{\text{до}}$ , а также усилением положительного влияния системы видеонаблюдения, входящей в КСБ.

Рассмотрим подробнее возможности увеличения вероятностей обнаружения пожара в выражении (7). Для этого проанализируем два основных на настоящий момент способа применения видеонаблюдения для обнаружения пожара и возможности повышения их эффективности.

### Результаты исследования

Пожарные извещатели с видеоканалом обнаружения (ИПВ) используются в составе системы пожарной сигнализации, размещаемой непосредственно на защищаемом объекте.

Проведенный анализ [6, 7] позволил выявить основные направления разработки и использования ИПВ в системах пожарной сигнализации:

- специализированные разработки для обнаружения отдельных факторов пожара (дыма, пламени)<sup>1</sup> [8–11];
- универсальные ИПВ для обнаружения комплекса факторов, сопровождающих пожар [12–16];
- совместное использование пожарного видеодетектора и других устройств обнаружения пожара, например, автоматических мультикритериальных извещателей и тепловизора [17].

Первые патенты на устройства обнаружения пожара по видеоизображению относятся к концу XX в. Вскоре аналогичные разработки появились и в России. В начале XXI в. на рынок стали поступать устройства обнаружения пожара, использующие средства видеонаблюдения. Однако как в России, так и за рубежом их разработку и применение в системах противопожарной защиты сдерживало отсутствие официально признанных нормативных требований, определяющих основные технические характеристики и методы их испытаний.

Первый стандарт на пожарные видеодетекторы для автоматических систем пожарной сигнализации был разработан компанией FM Approvals LLC в 2011 г. [18]. В 2017 г. был создан международный стандарт ISO/TS 7240-29:2017 Fire Detection and Alarm System — Part 29 Video Fire Detectors, который определяет требования, методы испытаний и критерии эффективности для использования

<sup>1</sup> Patent № US 5,926,280 A. Fire detection system utilizing relationship of correspondence with regard to image overlap / T. Yamagishi, M. Kishimoto; Nohmi Bosai Ltd. Appl. No. 08/901,074, 28.07.1997. Publ. 20.07.1999.

в системах обнаружения пожара и сигнализации пожарных видеозвещателей (VFD), работающих в видимом спектре и установленных в зданиях и вне их [19].

Требования к таким извещателям в России введены путем изменения 3 в ГОСТ Р 53704–2009, вступившего в действие в июне 2020 г. Это изменение трактуется достаточно широкое определение ИПВ и возможности его конструктивного исполнения. ИПВ, согласно требованиям стандарта, в зависимости от факторов обнаружения пожара, указанных в технической документации предприятия-изготовителя, должны реагировать на появление в поле зрения пламени и/или задымления.

Конструкция ИПВ не предусматривает обязательного моноблочного исполнения. В общем случае ИПВ может быть выполнен в виде выносного сенсора (объектива с видеокамерой) и общего устройства обработки контролируемых данных. При этом сенсор ИПВ может иметь возможность функционирования с несколькими объективами.

ИПВ или его блок обработки должен иметь оптические индикаторы либо возможность подключения выносного устройства индикации. Поэтому отличительной особенностью ИПВ от традиционных телекамер систем охранного или технологического видеонаблюдения становится наличие именно оптического индикатора. Изменение режима работы оптического индикатора (индикаторов) определяет переход извещателя в тревожный режим при испытаниях — отклик ИПВ. Какие-либо дополнительные требования к параметрам оптического индикатора и интерфейса ИПВ отсутствуют.

ИПВ может содержать встроенный или выносной источник подсветки, позволяющий обнаруживать пожар в условиях низкого уровня освещенности.

Вероятность достоверного обнаружения  $P_{до}$  является основным параметром извещателя при его работе в составе пожарной сигнализации, характеризует степень выполнения функции основного назначения, а именно эффективность работы ИПВ как средства обнаружения.

Следует отметить, что  $P_{до}$  определяется не только особенностями принципа действия самого извещателя, но и местом его размещения, ориентацией поля зрения, установленной чувствительностью и т.п. [20].

В процессе обнаружения присутствуют два практически независимых и последовательных этапа: установление тактического и приборного контакта цели с извещателем. Под тактическим контактом понимается процесс попадания цели в поле зрения извещателя. Приборный контакт характеризуется собственно процессом обнаружения.

Очевидно, что оба этих этапа являются функцией времени, как и соответствующие им вероятности.

$$P_{до}(t) = P_{тк}(t) P_{пк}(t), \quad (8)$$

где  $P_{тк}(t)$  — вероятность тактического контакта;  
 $P_{пк}(t)$  — вероятность приборного контакта.

Рассмотрим вероятность обнаружения ИПВ пожара за время  $t_d$ , считая  $P_{тк}(t) = 1$ .

$$t_o < t_d, \quad (9)$$

где  $t_o$  — время обнаружения пожара;  
 $t_d$  — время достоверного обнаружения цели исправным ИПВ.

$$P_{до}(t_o < t_d) = \int_0^{t_d} f(t_o) dt_o = \begin{cases} 1 - e^{-g_0 t_d}, & \text{при } t_d \geq 0; \\ 0, & \text{при } t_o < 0, \end{cases} \quad (10)$$

где  $g_0$  — мгновенная плотность вероятности обнаружения пожара ИПВ.

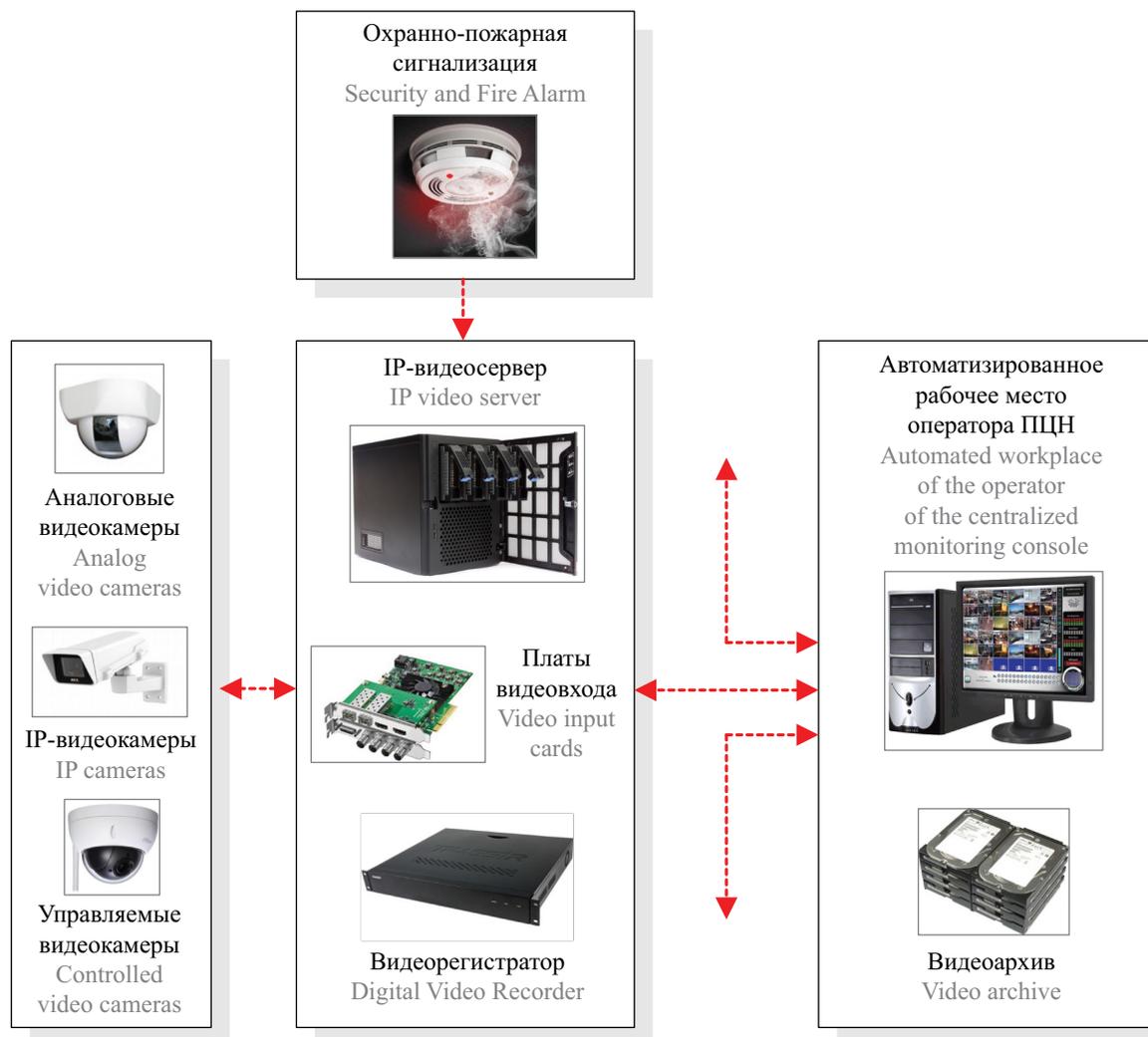
Время  $t_d$  может быть определено из значений времени фиксирования фактора возгорания, установленного в технических условиях. Это время подтверждается экспериментально при межведомственных и типовых испытаниях на заводе-изготовителе в соответствии с методикой ГОСТ Р 53704–2009. Считая вероятность достоверной реализации случайного события в таких испытаниях  $P_{до}(t_o < t_d) \geq 0,95$ , получим неравенство, из которого определим область значений  $t_d$ . Отсюда

$$t_d \geq 2,996/g_0. \quad (11)$$

Из выражения (11) следует, что уменьшение времени достоверного обнаружения пожара должно достигаться увеличением параметра  $g_0$ , определяемого методами получения и обработки видеозображения.

Пожарная видеоаналитика может быть использована в системе видеонаблюдения, входящей в состав КСБ объекта. В частности, в совершенствовании систем централизованной вневедомственной охраны различных объектов достигнут значительный прогресс благодаря разработке и технической реализации методов сбора и обработки видеoinформации [21]. Этому способствовало применение цифровых каналов связи с высокой скоростью передачи информации, а также современных надежных сигнальных процессоров, обеспечивающих синхронное аппаратное сжатие видео- и аудиопотоков.

На рис. 2 представлен обобщенный пример технической реализации функций фото- и видеофиксации в системе централизованного наблюдения. Наиболее простым способом является установка на объектах стационарного специализированного



**Рис. 2.** Схема реализации фото- и видеофиксации в системе централизованного наблюдения

**Fig. 2.** Photo and video surveillance in centralized surveillance system diagram

многоканального видеозаписывающего оборудования для захвата и сохранения видеоизображений с видеокамер — видеорегистраторов и видеосерверов.

Данное оборудование обеспечивает работу в триплексном режиме, т.е. допускает одновременный вывод данных в режиме реального времени, формирование архива и его воспроизведение. Совместное функционирование объектовой охранно-пожарной сигнализации и видеозаписывающего оборудования может быть реализовано на программном уровне как в автоматическом, так и в ручном режимах работы [21].

Программное обеспечение, осуществляющее взаимодействие с объектовым видеооборудованием и обработку полученной информации с возможностью использования видеоаналитики, интегрировано в автоматизированные рабочие места (АРМ) дежурного пульта управления. У оператора пульта

имеется возможность получать видео- и аудиоданные из архивов объектовых видеосерверов и серверов, размещенных в пункте централизованной охраны [21].

Данный способ реализации видеонаблюдения имеет недостаток, связанный с необходимостью установки на контролируемых объектах дополнительного регистрирующего оборудования. Кроме того, при определенной загруженности сети возможна задержка передачи пакетов видеoinформации, которая может достигать десятков секунд и даже минут. Более рациональным является другая схема организации размещения и взаимодействия оборудования, при которой в одном блоке совмещены функции приемно-контрольного охранно-пожарного прибора и устройств приема, хранения и передачи видео на пульт централизованного наблюдения [21].

Таким образом, видеонаблюдение позволяет получить и эффективно использовать дополнительную информацию о состоянии охраняемого объекта для принятия правильных решений и организации оперативных действий при возникновении пожара, криминальных и других внештатных событиях [21].

### Выводы

Эффективность применения видеонаблюдения для противопожарной защиты может быть оценена по уменьшению риска необнаружения пожара, который определяется как произведение максимальной вероятности возникновения пожара и вероятности его необнаружения используемыми техническими средствами и системами сигнализации.

Результаты оценки могут быть использованы при проектировании системы противопожарной защиты для обоснования параметров применяемых технических средств (систем) пожарной сигнализации и мер пожарной профилактики.

Снижение риска необнаружения пожара может быть достигнуто за счет применения в системе пожарной сигнализации пожарных извещателей с видеоканалом, обеспечивающих уменьшение времени достоверного обнаружения пожара.

Применение в автоматизированной КСБ системе видеонаблюдения дает дополнительные возможности увеличения эффективности обнаружения пожара в результате передачи и анализа видеoinформации в пункте централизованного наблюдения и управления.

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Брушлинский Н.Н., Соколов С.В., Кленко Е.А.* Основы теории пожарных рисков и ее приложения. М. : Академия ГПС МЧС России, 2011. 82 с.
2. *Зайцев А.В.* Достоверность и своевременность обнаружения пожара, и как их учесть в нормах на СПС // Алгоритм безопасности. 2016. № 2. С. 78–81.
3. *Членов А.Н., Рябцев Н.А., Буцынская Т.А.* Риск проникновения нарушителя на охраняемый промышленный объект // Технологии техносферной безопасности. 2019. № 2 (84). С. 132–137. DOI: 10.25257/TTS.2019.2.84.132-137
4. *Антоненко А.А., Буцынская Т.А., Членов А.Н.* Нормативное обеспечение систем комплексной безопасности объектов // Технологии техносферной безопасности. 2010. № 2 (30). С. 11.
5. *Зайцев А.Г., Членов А., Самышкина Е.* Роль стандартизации в аспекте обеспечения безопасности объектов и имущества // Алгоритм безопасности. 2015. № 2. С. 6–9.
6. *Членов А.Н.* Новые возможности управления противопожарной защитой объектов // Пожары и чрезвычайные ситуации: предотвращение, ликвидация. 2013. № 3. С. 48–53.
7. *Членов А.Н., Демехин Ф.В., Буцынская Т.А., Дровникова И.Г.* Новые направления применения видеотехнологий в системах безопасности // Вестник Московского энергетического института (Вестник МЭИ). 2009. № 3. С. 88–93.
8. Patent № US 5,926,280 A. Fire detection system utilizing relationship of correspondence with regard to image overlap / T. Yamagishi, M. Kishimoto; Nohmi Bosai Ltd. Appl. No. 08/901,074, 28.07.1997. Publ. 20.07.1999.
9. *Marbach G., Loepfe M., Brupbacher T.* An image processing technique for fire detection in video images // Fire Safety Journal. 2006. Vol. 41. Issue 4. Pp. 285–289. DOI: 10.1016/j.firesaf.2006.02.001
10. *Favorskaya M., Levitin K.* Early smoke detection in outdoor space by spatio-temporal clustering using a single video camera // Recent Advances in Knowledge-based Paradigms and Applications. Advances in Intelligent Systems and Computing. Vol. 234. Switzerland : Springer, 2014. Pp. 43–56. DOI: 10.1007/978-3-319-01649-8\_3
11. *Dukuzumuremyi J.P., Zou B., Hanyurwimfura D.* A Novel Algorithm for Fire/Smoke Detection based on Computer Vision // International Journal of Hybrid Information Technology. 2014. Vol. 7. Issue 3. Pp. 143–154. DOI: 10.14257/ijhit.2014.7.3.15
12. *Favorskaya M., Pyataeva A., Popov A.* Verification of smoke detection in video sequences based on spatio-temporal local binary patterns // Procedia Computer Science. 2015. Vol. 60. Pp. 671–680. DOI: 10.1016/j.procs.2015.08.205
13. *Минин И.В., Логачев В.Г.* Методика обнаружения возгорания с использованием цифровой обработки изображения // Фундаментальные исследования. 2016. № 6–2. С. 299–307.
14. *Schultze T., Kempka T., Willms I.* Audio–video fire-detection of open fires // Fire Safety Journal. 2006. Vol. 41. Issue 4. Pp. 311–314. DOI: 10.1016/j.firesaf.2006.01.002
15. *Celik T., Demirel H., Ozkaramanli H., Uyguroglu M.* Fire detection using statistical color model in video sequences // Journal of Visual Communication and Image Representation. 2007. Vol. 18. Issue 2. Pp. 176–185. DOI: 10.1016/j.jvcir.2006.12.003
16. *Toreyin B.U., Dedeoglu Y., Cetin A.E.* Flame detection in video using hidden Markov models // IEEE International Conference on Image Processing 2005. 2005. Vol. 2. P. 1230. DOI: 10.1109/ICIP.2005.1530284

17. Cetin A.E., Merci B., Günay O., Töreyn B.U., Verstockt S. *Methods and Techniques for Fire Detection: Signal, Image and Video Processing Perspectives*. Academic Press, 2016. 95 p.
18. Членов А.Н., Буцынская Т.А., Журавлев С.Ю., Николаев В.А. Об эффективности функционирования мультикритериального пожарного извещателя // Пожаровзрывобезопасность/Fire and Explosion Safety. 2016. Т. 25. № 12. С. 55–60. DOI: 10.18322/PVB.2016.25.12.55-60
19. Антипов О. Извещатели пожарные с видеоканалом обнаружения. Текущее состояние и перспективы // Системы безопасности. 2017. № 2. С. 93–95.
20. Здор В.Л., Землемеров М.А., Рыбаков И.В., Сурков С.А. Особенности и перспективы применения извещателей пожарных с видеоканалом обнаружения // Актуальные проблемы пожарной безопасности : мат. XXVIII междунар. науч.-практ. конф. 2016. С. 409–413.
21. Шаровар Ф.И. Принципы построения устройств и систем автоматической пожарной сигнализации. М. : Стройиздат, 1983. 335 с.
22. Серезевский А.В., Баринов И.А., Борисов С.П., Күзьмина Е.Н. Сравнительный анализ и перспективы развития использования средств фото и видеофиксации совместно с системами централизованного наблюдения // Алгоритм безопасности. 2016. № 2. С. 62–65.

## REFERENCES

1. Brushlinskiy N.N., Sokolov S.V., Klepko E.A. *Fundamentals of the Theory of Fire Risks and Its Applications*. Moscow, Academy of State Fire Service of EMERCOM of Russia Publ., 2011; 82. (rus.).
2. Zaytsev A.V. Reliability and timeliness of fire detection, and how to consider it in standards for fire alarm systems. *Algorithm Bezopasnosti Magazine*. 2016; 2:78-81. (rus.).
3. Chlenov A.N., Ryabtsev N.A., Butcinskaya T.A. Risk of entry of the offender to a protected industrial facility. *Technology of Technosphere Safety*. 2019; 2(84):132-137. DOI: 10.25257/TTS.2019.2.84.132-137 (rus.).
4. Antonenko A.A., Butcinskaya T.A., Chlenov A.N. Regulatory support of systems integrated safety of objects. *Technology of Technosphere Safety*. 2010; 2(30):11. (rus.).
5. Zaytsev A.G., Chlenov A., Samyshkina E. The role of standardization in terms of ensuring the safety of facilities and property. *Algorithm Bezopasnosti Magazine*. 2015; 2:6-9. (rus.).
6. Chlenov A.N. New opportunities of management of fire-prevention protection of objects. *Fires and Emergencies: Prevention, Elimination*. 2013; 3:48-53. (rus.).
7. Chlenov A.N., Demekhin F.V., Butcinskaya T.A., Drovnikova I.G. New directions in the application of video technology in security systems. *Vestnik Moskovskogo Energeticheskogo Instituta (Vestnik MEI)*. 2009; 3:88-93. (rus.).
8. United States Patent No. US 5,926,280 A. Fire detection system utilizing relationship of correspondence with regard to image overlap / T. Yamagishi, M. Kishimoto; Nohmi Bosai Ltd. Appl. No. 08/901,074, 28.07.1997. Publ. 20.07.1999.
9. Marbach G., Loepfe M., Brupbacher T. An image processing technique for fire detection in video images. *Fire Safety Journal*. 2006; 41(4):285-289. DOI: 10.1016/j.firesaf.2006.02.001
10. Favorskaya M., Levitin K. Early smoke detection in outdoor space by spatio-temporal clustering using a single video camera. *Recent Advances in Knowledge-based Paradigms and Applications. Advances in Intelligent Systems and Computing. Vol. 234*. Switzerland, Springer, 2014; 43-56. DOI: 10.1007/978-3-319-01649-8\_3
11. Dukuzumuremyi J.P., Zou B., Hanyurwimfura D. A Novel Algorithm for Fire/Smoke Detection based on ComputerVision. *International Journal of Hybrid Information Technology*. 2014; 7(3):143-154. DOI: 10.14257/ijhit.2014.7.3.15
12. Favorskaya M., Pyataeva A., Popov A. Verification of smoke detection in video sequences based on spatio-temporal local binary patterns. *Procedia Computer Science*. 2015; 60:671–680. DOI: 10.1016/j.procs.2015.08.205
13. Minin I.V., Logachev V.G. Fire detection method by using digital image processing. *Fundamental Research*. 2016; 6-2:299-307. (rus.).
14. Schultze T., Kempka T., Willms I. Audio–video fire-detection of open fires. *Fire Safety Journal*. 2006; 41(4):311-314. DOI: 10.1016/j.firesaf.2006.01.002
15. Celik T., Demirel H., Ozkaramanli H., Uyguroglu M. Fire detection using statistical color model in video sequences. *Journal of Visual Communication and Image Representation*. 2007; 18(2):176-185. DOI: 10.1016/j.jvcir.2006.12.003
16. Töreyn B.U., Dedeoglu Y., Cetin A.E. Flame detection in video using hidden Markov models. *IEEE International Conference on Image Processing 2005*. 2005; 2:1230. DOI: 10.1109/ICIP.2005.1530284
17. Cetin A.E., Merci B., Günay O., Töreyn B.U., Verstockt S. *Methods and techniques for fire detection: signal, image and video processing perspectives*. Academic Press, 2016; 95.

18. Chlenov A.N., Butsynskaya T.A., Zhuravlev S.Yu., Nikolaev V.A. Operation efficiency of multicriterial fire detector. *Pozharovzryvobezопасnost/Fire and Explosion Safety*. 2016; 25(12):55-60. DOI: 10.18322/PVB.2016.25.12.55-60 (rus.).
19. Antipov O. Fire detectors with video detection channel. Current status and prospects. *Security and Safety*. 2017; 2:93-95. (rus.).
20. Zdor V.L., Zemlemerov M.A., Rybakov I.V., Surkov S.A. Features and prospects for the use of fire detectors with video detection channel. *Actual Problems of Fire Safety : Materials of the XXVIII International Scientific-Practical Conference*. 2016; 409-413. (rus.).
21. Sharovar F.I. *Principles of building devices and systems for automatic fire alarm*. Moscow, Stroyizdat Publ., 1983; 335.
22. Serezevskiy A.V., Barinov I.A., Borisov S.P., Kuzmina E.N. Comparative analysis and development prospects for the use of photo and video fixation tools in conjunction with centralized surveillance systems. *Algoritm Bezopasnosti Magazine*. 2016; 2:62-65. (rus.).

Поступила 11.05.2020, после доработки 23.05.2020;

принята к публикации 29.05.2020

Received 11 May 2020; Received in revised form May 23 2020;

Accepted May 29, 2020

### Информация об авторах

**ЧЛЕНОВ Анатолий Николаевич**, д-р техн. наук, профессор, заслуженный работник высшей школы РФ, профессор кафедры пожарной автоматики, Академия Государственной противопожарной службы МЧС России, г. Москва, Российская Федерация; Author ID: 474756, ORCID: 0000-0002-9774-1504; e-mail: chlenov@mail.ru

**БУЦЫНСКАЯ Татьяна Анатольевна**, канд. техн. наук, доцент, старший научный сотрудник Учебно-научного комплекса автоматизированных систем и информационных технологий, Академия Государственной противопожарной службы МЧС России, г. Москва, Российская Федерация; Author ID: 631650, ORCID: 0000-0002-4859-9011, e-mail: butcinskaya@mail.ru

### Information about the authors

**Anatoliy N. CHLENOV**, Dr. Sci (Eng.), Professor, Honored Worker of Higher Education of Russian Federation, Professor of Department of Fire Automation, Academy of the State Fire Service of Emercom of Russia, Moscow, Russian Federation; Author ID: 474756, ORCID: 0000-0002-9774-1504; e-mail: chlenov@mail.ru

**Tatiana A. BUTCINSKAYA**, Cand. Sci. (Eng.), Associate Professor, Senior Researcher of the Educational and Scientific Complex of Automated Systems and Information Technologies, Academy of the State Fire Service of Emercom of Russia, Moscow, Russian Federation; Author ID: 631650, ORCID: 0000-0002-4859-9011; e-mail: butcinskaya@mail.ru

## Исследование термической устойчивости пены различной кратности

© А.В. Кокшаров✉, С.И. Осипенко, Е.В. Гайнулина

Уральский институт Государственной противопожарной службы МЧС России (Россия, 620062, г. Екатеринбург, ул. Мира, 22)

### АННОТАЦИЯ

**Введение.** В настоящее время промышленность выпускает широкий спектр пеногенераторов для получения огнетушащих пен, а производимые ими пены существенно различаются кратностью и, соответственно, устойчивостью в условиях пожара. Поскольку основное разрушающее действие на пену оказывают тепловые потоки, то целью данной работы является установление закономерностей разрушения пены различной кратности при термическом воздействии.

**Методы исследования.** В испытаниях использовали пену кратностью от 7,5 до 80, полученную механическим взбиванием 6%-го раствора пенообразователя ПО-6РЗ. Термическая устойчивость пены изучалась при воздействии теплового потока от пламени газовой горелки на слой пены. При проведении эксперимента фиксировали изменение высоты столба пены во времени.

**Результаты и обсуждение.** Результаты измерений, представленные в виде зависимости скорости разрушения слоя пены от времени, количества высвобожденной жидкой фазы на 1 м<sup>2</sup>·с, зависимости скорости разрушения слоя пены от ее плотности, позволили выявить ряд закономерностей. Скорость разрушения пены кратностью до 30 на протяжении всего времени термического воздействия остается постоянной. С повышением кратности пены наблюдается возрастание скорости разрушения на начальном этапе воздействия теплового потока. При кратности пены более 50 на начальном этапе происходит резкое увеличение скорости разрушения, которая в дальнейшем снижается по мере уменьшения столба пены. В условиях эксперимента лучшие характеристики показала пена кратностью 50, поскольку у пены с меньшей кратностью существенный вклад в ее разрушение вносит синерезис, а пены с большей кратностью разрушаются при механическом воздействии конвективных потоков пламени.

**Заключение.** Исследование закономерностей разрушения пены при термическом воздействии позволило установить, что ее разрушение лимитируется скоростью обеднения верхних слоев жидкостью.

**Ключевые слова:** пенообразователь; термическое воздействие; синерезис; разрушение пены; конвективный поток пламени

**Для цитирования:** Кокшаров А.В., Осипенко С.И., Гайнулина Е.В. Исследование термической устойчивости пены различной кратности // Пожаровзрывобезопасность/Fire and Explosion Safety. 2020. Т. 29. № 3. С. 103–110. DOI: 10.22227/PVB.2020.29.03.103-110

✉ Кокшаров Александр Викторович, e-mail: koksharovab@e1.ru

## Study of the thermal stability of foam of different expansion ratio

© Aleksandr V. Koksharov✉, Sergey I. Osipenko, Elena V. Gaynullina

Ural Institute of State Fire Service of Emercom of Russia (Mira St., 22, Yekaterinburg, 620062, Russian Federation)

### ABSTRACT

**Introduction.** Currently, the industry produces a wide range of foam generators to produce fire-extinguishing foams, and the foams they produce differ significantly in their expansion ratio and, consequently, fire resistance. Since heat fluxes have the main destructive effect on the foam, the purpose of this paper is to establish the patterns of destruction of foam of different expansion ratio when heated.

**Methods of Research.** The foam with expansion ratio from 7.5 to 80 was used for the tests. It was obtained by mechanical beating of 6 % solution of foaming agent PO-6RZ. The thermal stability of the foam was studied when the heat flow from the gas burner flame affects the foam layer. During the experiment, the change in the height of the foam column in time was recorded.

**Results and Discussion.** The results of measurements, presented in the form of dependence of foam layer destruction rate on time, quantity of released liquid phase on 1 m<sup>2</sup>·s, dependence of foam layer destruction rate on its density allowed revealing a number of patterns. The destruction rate of foam with an expansion ratio of up to 30 remains constant throughout the entire duration of thermal exposure. As the foam expansion ratio increases, the rate of destruction at the initial stage of heat flux exposure increases. With a foam expansion ratio of more than 50, there is initially a sharp increase in the rate of destruction, which subsequently decreases as the foam column decreases. In the conditions of the experiment, the best characteristics were shown by the foam with an expansion ratio of 50, because in the foam with a smaller expansion ratio

the syneresis makes a significant contribution to its destruction, and the foams with a larger expansion ratio are destroyed by the mechanical effect of convective flame flows.

**Conclusion.** The study of the foam destruction patterns under thermal impact allowed establishing the fact that its destruction is limited by the rate of impoverishment of the upper layers with liquid.

**Keywords:** foaming agent; thermal effect; syneresis; foam destruction; convective flame flow

**For citation:** Koksharov A.V., Osipenko S.I., Gaynullina E.V. Study of the thermal stability of foam of different expansion ratio. *Pozharovzryvobezopasnost/Fire and Explosion Safety*. 2020; 29(3):103-110. DOI: 10.22227/PVB.2020.29.03.103-110

✉ Aleksandr Viktorovich Koksharov, e-mail: koksharovab@e1.ru

## Введение

В настоящее время промышленность выпускает широкий спектр пеногенераторов: ГПС, «Пурга», стволы СВП и ОРТ с различными насадками. Также в пожарно-спасательные подразделения поступает пожарная техника, позволяющая получать компрессионную пену [1, 2]. Несмотря на заявления производителей об эффективности данной пены, отсутствуют количественные данные об ее огнетушащей способности, что вызывает затруднения при планировании пожаротушения и сравнительной оценке эффективности компрессионной пены и пены, полученной с помощью других доступных пеногенераторов [3, 4].

Пена, производимая различными устройствами, различается кратностью, в связи с чем следует ожидать разную огнетушащую способность. Причиной может быть разная скорость нагрева пенных пленок. Поверхностная активность молекул поверхностно-активных веществ (ПАВ) зависит от температуры раствора, с ее повышением происходит миграция молекул ПАВ с адсорбированных слоев в объем раствора, в результате чего снижается прочность пленки вплоть до ее разрушения [5–9].

В пенах высокой и средней кратности пузырьки имеют очень тонкую оболочку, поэтому при термическом воздействии происходит практически мгновенное нагревание и разрушение пенной пленки [10, 11]. В результате такого быстрого разрушения пена может даже не достичь поверхности горючего вещества [12, 13]. Для низкократных пен за счет высокого содержания жидкой фазы, напротив, требуется большее время на нагрев пены и, как следствие, наблюдается повышенная термическая устойчивость. Однако для получения низкократных пен требуется большое количество пенообразующего раствора [14].

Знание причин и закономерностей термического разрушения пены может оказаться полезным для решения проблемы устойчивости пены в условиях пожара и для разработки эффективных способов ее практического использования.

Поэтому целью работы стало проведение лабораторных исследований и установление закономерностей разрушения пены различной кратности при термическом воздействии.

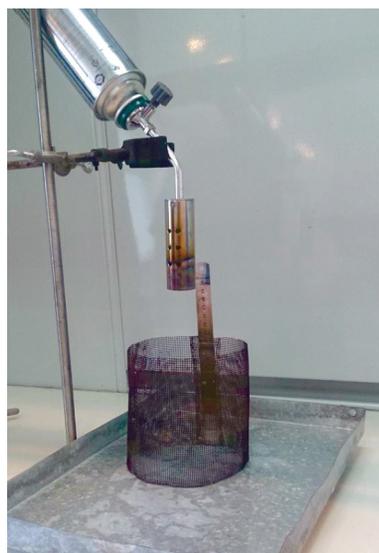
## Методы исследования

В испытаниях использовалась пена кратностью от 7,5 до 80, полученная механическим взбиванием 6 %-го раствора пенообразователя ПО-6РЗ.

Для получения пены был выбран синтетический углеводородный пенообразователь общего назначения ПО-6РЗ, поскольку он получил наиболее широкое применение по сравнению с перфторированными пенообразователями [15, 16].

Термическая устойчивость пены изучалась на установке (рис. 1) под действием теплового потока от пламени газовой горелки на слой пены. Воздействие проводилось при высокой температуре, чтобы снизить влияние на процесс разрушения пены других параллельных процессов (синерезис, коалесценция, испарение жидкости с поверхностных слоев и т.п.) [17].

Пеной наполнялся цилиндр, изготовленный из металлической сетки. Сетка не препятствовала движению продуктов горения от газовой горелки, поэтому поверхность пены довольно равномерно подвергалась нагреванию. При проведении эксперимента фиксировалось изменение высоты столба пены от времени.



**Рис. 1.** Установка для определения термической устойчивости пены

**Fig. 1.** Foam thermal stability unit

## Результаты и обсуждение

Результаты проведенных экспериментов представлены в табл. 1. Как и следовало ожидать, с повышением кратности пены возрастает скорость ее разрушения при термическом воздействии.

Дифференциальная форма  $dh/dt$  позволяет установить, как изменялась скорость разрушения пены в процессе эксперимента (табл. 2).

Скорость разрушения пены кратностью до 30 на протяжении всего времени термического воздействия остается примерно постоянной. Затем, с повышением кратности пены наблюдается незначительное возрастание скорости разрушения на на-

чальном этапе воздействия по сравнению со скоростью в конце эксперимента. У пены кратностью более 50 наблюдается резкое увеличение скорости разрушения на начальном этапе, в дальнейшем скорость разрушения снижается по мере уменьшения столба пены. Данный факт можно объяснить механическим разрушающим воздействием пламени на тонкие пенные пленки [17, 18]. Впоследствии высвобожденная влага питает нижележащие слои, что приводит к утолщению пузырьков оболочек, которые становятся гораздо более устойчивыми к механическому воздействию, и дальнейшее разрушение пены при термическом воздействии происходит с меньшей скоростью.

**Таблица 1.** Изменение высоты столба пены  $h$ , см, при термическом воздействии пламени газовой горелки в течение времени  $t$ , с

**Table 1.** Change of the height of the foam column  $h$ , cm, under the thermal influence of the gas burner flame during the time  $t$ , s

Высота столба пены $h$ , см Foam column height $h$ , cm	Кратность пены $K_n$ / Foam expansion ratio $E_f$														
	7,5	10	15	20	25	30	35	40	45	50	55	60	65	70	80
13	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
12	16	12	7	7	5	4	3	3	2	2	2	2	1	1	1
10	38	27	23	17	14	13	9	9	8	7	6	5	3	3	3
8	60	44	38	29	25	22	16	16	15	13	10	11	7	7	6
6	78	58	49	42	37	31	26	25	23	21	15	16	10	10	10
4	92	72	62	53	49	39	34	31	30	29	23	22	16	15	14
2	115	91	78	64	58	47	43	40	38	37	30	27	22	21	17

**Таблица 2.** Скорость разрушения столба пены  $dh/dt$ , см/с, под термическим воздействием пламени газовой горелки в зависимости от высоты столба пены  $h$ , см

**Table 2.** Destruction rate of foam column  $dh/dt$ , cm/s, under the thermal influence

Высота столба пены $h$ , см Foam column height $h$ , cm	Кратность пены $K_n$ / Foam expansion ratio $E_f$														
	7,5	10	15	20	25	30	35	40	45	50	55	60	65	70	80
13	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
12	0,06	0,08	0,14	0,14	0,19	0,24	0,32	0,40	0,42	0,50	0,50	0,67	1,1	1,1	1,1
10	0,09	0,14	0,13	0,19	0,23	0,24	0,32	0,30	0,36	0,38	0,50	0,57	1,1	1,1	1,1
8	0,09	0,11	0,14	0,17	0,18	0,21	0,30	0,30	0,28	0,33	0,45	0,33	0,51	0,51	0,51
6	0,11	0,15	0,17	0,16	0,17	0,22	0,21	0,23	0,26	0,28	0,42	0,42	0,51	0,50	0,67
4	0,14	0,14	0,16	0,18	0,17	0,24	0,24	0,30	0,29	0,24	0,26	0,34	0,36	0,40	0,56
2	0,09	0,11	0,13	0,18	0,22	0,26	0,22	0,24	0,26	0,24	0,29	0,38	0,34	0,33	0,57
Среднее Average	0,10	0,12	0,14	0,17	0,19	0,24	0,27	0,29	0,31	0,33	0,40	0,45	0,60	0,69	0,77

**Таблица 3.** Средняя скорость разрушения пены в зависимости от кратности**Table 3.** Average foam destruction rate depending on expansion ratio

Скорость разрушения пены, л/м <sup>2</sup> ·с, 10 <sup>-2</sup> Foam destruction rate, l/m <sup>2</sup> ·s, 10 <sup>-2</sup>	Кратность пены $K_n$ / Foam expansion ratio $E_f$														
	7,5	10	15	20	25	30	35	40	45	50	55	60	65	70	80
	13	12	9,5	8,5	7,8	7,9	7,7	7,3	6,9	6,6	7,3	7,5	10,1	9,9	9,6

Представление скорости разрушения пены в виде количества высвобожденной жидкой фазы с 1 м<sup>2</sup>·с имеет практическую значимость, поскольку показывает критическую интенсивность подачи рабочего раствора пенообразователя для получения пены, формирующей пенный слой на горючем веществе (табл. 3). Наименьшая скорость разрушения в условиях проведения эксперимента наблюдается для пены кратностью 50.

Пена низкой кратности разрушается медленнее прочих (см. табл. 3), но поскольку она содержит большое количество жидкой фазы, то для восполнения ее объема требуется израсходовать такое же количество раствора, что и содержалось в разрушившейся пене. Поэтому, чем ниже кратность пены, тем выше должна быть интенсивность подачи пенообразователя в растворе.

Пены высокой кратности разрушаются не только от тепла, но и от механического воздействия конвективных потоков. Наличие дополнительного разрушающего фактора приводит к увеличению скорости разрушения пены и, как следствие, к критической интенсивности подачи пены при тушении пожара (см. табл. 3).

Предположительно, механизм разрушения пены связан с достижением определенного критического значения температуры пенных пленок. Отсюда можно предположить, что скорость разрушения пены должна линейно зависеть от толщины пенной пленки, которая пропорциональна плотно-

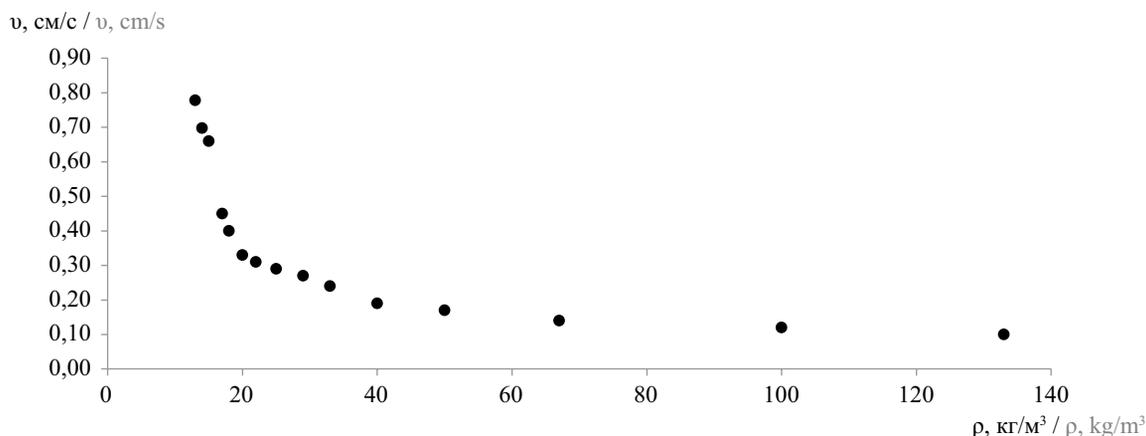
сти пены. Проследить характер зависимости можно, если построить график зависимости скорости разрушения столба пены (см/с) от плотности пены (кг/м<sup>3</sup>) (рис. 2).

На графике можно выделить три участка (см. рис. 2). Для пены плотностью от 12,5 кг/м<sup>3</sup> ( $K_n = 80$ ) до 20 кг/м<sup>3</sup> ( $K_n = 50$ ) наблюдается линейное снижение скорости разрушения. Сильное падение скорости разрушения пены связано с утолщением пузырьковой пленки и повышением ее способности сопротивляться разрыву при воздействии конвективных потоков, вызванных пламенем.

При плотности 20 кг/м<sup>3</sup> ( $K_n = 50$ ) на графике присутствует точка перегиба, появление которой связано с тем, что при утолщении пенные пленки становятся устойчивыми к механическому воздействию и разрушаются только под воздействием температуры [19].

При дальнейшем увеличении плотности пены с 20 до 40 кг/м<sup>3</sup> ( $K_n = 25$ ) скорость разрушения пены линейно снижается. При увеличении содержания влаги в пене в 2 раза, скорость разрушения снижается примерно в 1,7 раза. Увеличение количества жидкой фазы при постоянстве величины теплового потока приводит к увеличению времени достижения температуры, при которой происходит разрушение пены, следствием чего является снижение скорости разрушения.

При плотности пены более 40 кг/м<sup>3</sup> ( $K_n = 25$ ) скорость разрушения пены снижается незначитель-

**Рис. 2.** График зависимости скорости разрушения высоты столба пены ( $v$ ) от плотности пены ( $\rho$ )**Fig. 2.** Dependency graph of the foam column height destruction rate ( $v$ ) from the foam density ( $\rho$ )

но. Это связано с тем, что существенную роль начинает играть синерезис, который приводит к уменьшению плотности верхней части пены, поэтому термическому воздействию подвергается уже пена с меньшим содержанием жидкой фазы.

С другой стороны, пена представляет собой сложную динамическую систему, в которой происходит множество процессов. После образования пены начинается синерезис [6, 10, 20]. Истечение жидкости может быть остановлено за счет капиллярных сил, но такое явление происходит только в пенах с очень тонкой пузырьковой оболочкой [17]. В результате обеднения жидкостью стенки пузырьков верхнего слоя становятся очень тонкими и неустойчивыми к механическому воздействию. При таком рассмотрении механизма разрушения пены при термическом воздействии становится очевидно, что процесс разрушения пены лимитирует истечение жидкости, а не нагревание пены до определенной температуры.

У пузырьков верхнего слоя под действием гравитационных сил жидкость скапливается в нижней части межпленочного пространства, что приводит к утончению верхней части пленки. Утончение пленки происходит также в результате испарения жидкости. Под действием теплового потока и напора газов тонкая пленка рвется, и пузырек разрушается. Выделившаяся влага проникает в межпленочное пространство следующего слоя пены, вытесняя из нее жидкость. Процесс повторяется заново. При таком механизме температурному воздействию подвергается одна и та же жидкость. Таким образом, при разрушении пены на ее поверхности должен образовываться достаточно тонкий разогретый слой.

Для подтверждения действия второго механизма разрушения пены и определения толщины прогретого слоя была установлена термопара в нижней части пены.

В результате было выявлено, что при толщине слоя пены 13 см в начале эксперимента повышение температуры фиксировалось, когда толщина остаточного слоя пены составляла 4...5 мм (табл. 4), что значительно меньше, чем указано в работе [9], где предполагалось, что прогревается от 30 до 50 % от общего объема пены.

Температура прогретого слоя составляла 50...58 °С, что значительно ниже температуры потери пенообразующей способности используемого пенообразователя, которая была определена отдельно и составила 95...98 °С.

Таким образом, можно утверждать, что процесс разрушения пены лимитирует скорость проникновения жидкости, выделившейся в результате разрушения пены, в нижележащие слои.

**Таблица 4.** Измерение температуры в нижней части пены

**Table 4.** Measurement of temperature at the bottom of foam

Кратность пены Foam expansion ratio	Время полного разрушения пены, с Foam complete destruction time, s	Температура жидкости после полного разрушения пены. °С Liquid temperature after complete destruction of foam, °С	Толщина нагретого слоя, мм Heated layer thickness, mm
10	92	54	8
20	66	50	5
30	46	52	5
40	40	57	4
50	37	58	4

Ранее такой эффект наблюдался нами при стабилизации пены натриевой солью карбоксиметилцеллюлозы [21]. Из-за повышенной вязкости жидкой фазы она не успевала пройти по пенным каналам при разрушении пены, в результате чего скапливалась на поверхности пены, защищая ее от разрушения.

Рассматривая процесс разрушения пены с позиций действия второго механизма, высокую скорость разрушения пены кратностью более 50 в начале эксперимента можно объяснить быстрым нагревом и механическим разрушением пенных оболочек (см. табл. 1). Снижение скорости происходит по мере достижения такого объема жидкости, образовавшегося в результате разрушения пузырьков, который не успевает пройти по пенным каналам и скапливается в верхнем слое пены, в результате чего снижается ее скорость разрушения.

### Заключение

Исследование закономерностей разрушения пены при температурном воздействии позволило установить, что ее разрушение лимитируется скоростью обеднения верхних слоев жидкостью. Соответственно удержание влаги в верхнем слое пены позволит значительно повысить ее устойчивость в условиях термического воздействия.

Огнетушащая эффективность пены, выраженная в минимальной интенсивности подачи пенообразующего раствора, зависит от вклада двух процессов: синерезиса и механического разрушения пены вследствие минимальной толщины пенной пленки. В условиях эксперимента минимальный вклад данных процессов наблюдался для пены кратностью 50. В реальных условиях пожара можно ожидать другое значение кратности пены, что открывает поле для дальнейших исследований.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Чайковский Е.В. Огонь и «Натиск» // Пожаровзрывобезопасность/Fire and Explosion Safety. 2006. Т. 15. № S2. С. 20–22.
2. Taylor R.G. Technical report 98: Compressed air foam systems in limited staffing conditions. Morristown, New Jersey : Morristown Fire Bureau, 1998. Pp. 75–112.
3. Ольховский И.А., Фещенко А.Н., Меженев В.А., Скворцов С.С. Способ определения кратности пены при подаче из воздушно-пенных и лафетных стволов с пенными насадками // Пожары и чрезвычайные ситуации: предотвращение, ликвидация. 2019. № 4. С. 57–61. DOI: 10.25257/FE.2019.4.57-61
4. Гайнуллина Е.В., Якубова Т.В., Крехтунов А.А. Исследование возможности улучшения огнетушащих свойств воздушно-механических пен // Современные технологии обеспечения гражданской обороны и ликвидации последствий чрезвычайных ситуаций. 2015. № 1–1 (6). С. 78–80.
5. Exerowa D., Kruglyakov P.M. Foam and foam films — theory, experiment, applications. Amsterdam : Elsevier Science B.V., 1998. 773 p. DOI: 10.1016/s1383-7303(98)x8001-4
6. Kruglyakov P.M. Equilibrium properties of free films and stability of foams and emulsions // Thin Liquid Films. New York : Marcel Dekker, 1988. Pp. 767–818.
7. Murray B.S. Stabilization of bubbles and foams // Current Opinion in Colloid & Interface Science. 2007. Vol. 12. Issues 4–5. Pp. 232–241. DOI: 10.1016/j.cocis.2007.07.009
8. Пашковский П.С. Температурные условия устойчивого пенообразования на сетках // Научный вестник НИИГД Респиратор. 2018. № 3 (55). С. 19–27.
9. Воевода С.С., Шароварников А.Ф., Бастриков Д.Л., Крутов М.А. Влияние факторов пожара на огнетушащую эффективность пленкообразующих пенообразователей // Пожаровзрывобезопасность/Fire and Explosion Safety. 2012. Т. 21. № 10. С. 63–65.
10. Кругляков П.М., Ексерова Д.Р. Пена и пенные пленки. М. : Химия, 1990. 432 с.
11. Gochev G., Platikanov D., Miller R. Chronicles of foam films // Advances in Colloid and Interface Science. 2016. Vol. 233. Pp. 115–125. DOI: 10.1016/j.cis.2015.08.009
12. Артемьев Н.С., Подгрудный А.В., Опарин Д.Е. Коэффициент разрушения воздушно-механической пены средней кратности при тушении жидкости в резервуаре // Пожаровзрывобезопасность/Fire and Explosion Safety. 2007. Т. 16. № 1. С. 82–83.
13. Guan J.-L., Yu Z.-F., Kuang K.-Q., Xiao X.-K., Hu C. Large petrochemical reservoir fire characteristics and emergency rescue forces needs analysis // 2014 7th International Conference on Intelligent Computation Technology and Automation. 2014. Pp. 322–326. DOI: 10.1109/ICICTA.2014.85
14. Sheng Y., Jiang J., Lu S., Li C. Fluorinated and fluorine-free firefighting foams spread on heptane surface // Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects. 2018. Vol. 552. Pp. 1–8. DOI: 10.1016/j.colsurfa.2018.05.004
15. Бочаров В.В., Раевская М.В. Использование перфторированных ПАВ в пенообразователях – «второе пришествие» галогенорганики с наихудшим сценарием развития для обитателей земли // Пожаровзрывобезопасность/Fire and Explosion Safety. 2013. Т. 22. № 10. С. 75–82.
16. Дадашов И.Ф., Куреев А.А., Трегубов Д.Г. Экспериментальное исследование скорости выгорания и условий тушения модельного очага пожара класса в при поочередном применении гранулированного пеностекла и гелеобразующего огнетушащего вещества // Науковий вісник: Цивільний захист та пожежна безпека. 2018. Т. 1. № 2 (6). С. 70–78. DOI: 10.33269/nvcz.2018.2.70-78
17. Вилкова Н.Г. Свойства пен и методы их исследования : монография. Пенза, 2014. 120 с.
18. Кругляков П.М., Кочубей Н.В., Кузнецова Л.Л. О взаимосвязи внутреннего разрушения пены и уменьшения ее объема // Коллоидный журнал. 1983. Т. 45. № 5. С. 893–900.
19. Канн К.Б. Капиллярная гидродинамика пен. Новосибирск : Наука, 1989. 167 с.
20. Princen H.M. Gravitational syneresis in foams and concentrated emulsions // Journal of Colloid and Interface Science. 1990. Vol. 134. Issue 1. Pp. 188–197. DOI: 10.1016/0021-9797(90)90266-q
21. Кокшаров А.В., Марков В.Ф., Бучельников Д.Ю., Терентьев В.В. Стабилизация пены низкой кратности натриевой солью карбоксиметилцеллюлозы // Пожаровзрывобезопасность/Fire and Explosion Safety. 2014. Т. 23. № 10. С. 79–83.
22. Demitri C., Giuri A., Raucci M.G., Giugliano D., Madaghiele M., Sannino A. et al. Preparation and characterization of cellulose-based foams via microwave curing // Interface Focus. 2014. Vol. 4. Issue 1. P. 20130053. DOI: 10.1098/rsfs.2013.0053

## REFERENCES

1. Chaikovskii E.V. Fire and "Onslaught". *Pozharovzryvobezopasnost/Fire and Explosion Safety*. 2006; 15(S2):20-22. (rus.).
2. Taylor R.G. *Technical Report 98: Compressed Air Foam Systems in Limited Staffing Conditions*. Morristown, New Jersey, Morristown Fire Bureau, 1998; 75-112.
3. Olkhovskiy I.A., Feschenko A.N., Mezhenov V.A., Skvortsov S.S. Method for determining foam expansion when delivering from foam cannons and monitors with foam nozzles. *Fire and Emergencies: Prevention, Elimination*. 2019; 4:57-61. DOI: 10.25257/FE.2019.4.57-61
4. Gainullina E.V., Yakubova T.V., Krektunov A.A. Investigation of the possibility of improving the fire extinguishing properties of air-mechanical foams. *Modern Technologies for Civil Defense and Emergency Response*. 2015; 1-1(6):78-80. (rus.).
5. Exerowa D., Kruglyakov P.M. *Foam and Foam Films – Theory, Experiment, Applications*. Amsterdam, Elsevier Science B.V., 1998; 773. DOI: 10.1016/s1383-7303(98)x8001-4
6. Kruglyakov P.M. *Equilibrium Properties of Free Films and Stability of Foams and Emulsions. Thin Liquid Films*. New York, Marcel Dekker, 1988; 767-818.
7. Murray B.S. Stabilization of bubbles and foams. *Current Opinion in Colloid & Interface Science*. 2007; 12(4-5):232-241. DOI: 10.1016/j.cocis.2007.07.009
8. Pashkovskiy P.S. Temperature conditions of the steady foaming on nets. *Scientific Bulletin of the NIIGD "Respirator"*. 2018; 3(55):19-27. (rus.).
9. Voevoda S.S., Sharovarnikov A.F., Bastrikov D.L., Krutov M.A. Influence of fire factors on the extinguishing efficiency of film-forming foaming agents. *Pozharovzryvobezopasnost/Fire and Explosion Safety*. 2012; 21(10):63-65. (rus.).
10. Kruglyakov P.M., Ekserova D.R. *Foam and Foam Films*. Moscow, Khimiya Publ., 1990; 432. (rus.).
11. Gochev G., Platikanov D., Miller R. Chronicles of foam films. *Advances in Colloid and Interface Science*. 2016; 233:115-125. DOI: 10.1016/j.cis.2015.08.009
12. Artemyev N.S., Podgrushnyy A.V., Oparin D.E. The destruction coefficient of the air-mechanical foam of medium multiplicity by extinguishing the liquid in the tank. *Pozharovzryvobezopasnost/Fire and Explosion Safety*. 2007; 16(1):82-83. (rus.).
13. Guan J.-L., Yu Z.-F., Kuang K.-Q., Xiao X.-K., Hu C. Large petrochemical reservoir fire characteristics and emergency rescue forces needs analysis. *2014 7th International Conference on Intelligent Computation Technology and Automation*. 2014; 322-326. DOI: 10.1109/ICICTA.2014.85
14. Sheng Y., Jiang J., Lu S., Li C. Fluorinated and fluorine-free firefighting foams spread on heptane surface. *Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects*. 2018; 552:1-8. DOI: 10.1016/j.colsurfa.2018.05.004
15. Bocharov V.V., Raevskaya M.V. The increased use of perfluorinated surfactants – "second coming" of organohalogen compounds with the worst scenario of development for inhabitants of Earth. *Pozharovzryvobezopasnost/Fire and Explosion Safety*. 2013; 22(10):75-82. (rus.).
16. Dadashov I., Kirieiev O., Trehubov D. Experimental research of burn rate and terms of extinguishing of standardized fire source of class b by consistent application of granular foam glass and gel-forming extinguishant. *Scientific Bulletin: Civil Protection and Fire Safety*. 2018; 1:2(6):70-78. DOI: 10.33269/nvcz.2018.2.70-78 (rus.).
17. Vilkova N.G. *Properties of Foams and Methods of Their Research: the Monograph*. Penza, 2014; 120. (rus.).
18. Kruglyakov P.M., Kochubey N.V., Kuznetsova L.L. About the interconnection of internal destruction of the foam and decrease of its volume. *Colloid Journal of the USSR*. 1983; 45(5):893-900. (rus.).
19. Kann K.B. *Capillary Hydrodynamics of Foams*. Novosibirsk, Nauka Publ., 1989; 167. (rus.).
20. Princen H.M. Gravitational syneresis in foams and concentrated emulsions. *Journal of Colloid and Interface Science*. 1990; 134(1):188-197. DOI: 10.1016/0021-9797(90)90266-q
21. Koksharov A.V., Markov V.F., Buchelnikov D.Yu., Terentyev V.V. Stabilization of high density foams sodium salt of carboxymethylcellulose. *Pozharovzryvobezopasnost/Fire and Explosion Safety*. 2014; 23(10):79-83. (rus.).
22. Demitri C., Giuri A., Raucci M.G., Giugliano D., Madaghiale M., Sannino A. et al. Preparation and characterization of cellulose-based foams via microwave curing. *Interface Focus*. 2014; 4(1):20130053. DOI: 10.1098/rsfs.2013.0053

Поступила 14.04.2020, после доработки 22.05.2020;

принята к публикации 28.05.2020

Received April 14, 2020; Received in revised form May 22, 2020;

Accepted May 28, 2020

**Информация об авторах**

**КОКШАРОВ Александр Викторович**, канд. хим. наук, доцент кафедры пожаротушения и аварийно-спасательных работ, Уральский институт Государственной противопожарной службы МЧС России, г. Екатеринбург, Российская Федерация; Author ID: 182341, ORCID: 0000-0003-4628-7644; e-mail: koksharovab@e1.ru

**ОСИПЕНКО Сергей Игоревич**, старший преподаватель кафедры пожаротушения и аварийно-спасательных работ, Уральский институт Государственной противопожарной службы МЧС России, г. Екатеринбург, Российская Федерация; Author ID: 1011020, ORCID: 0000-0003-0117-3547; e-mail: angero07@rambler.ru

**ГАЙНУЛЛИНА Елена Викторовна**, канд. техн. наук, доцент, доцент кафедры химии и процессов горения, Уральский институт Государственной противопожарной службы МЧС России, г. Екатеринбург, Российская Федерация; Author ID: 1072896, ORCID: 0000-0002-8278-3111; e-mail: helen\_vaytner@mail.ru

**Information about the authors**

**Aleksandr V. KOKSHAROV**, Cand. Sci. (Chem.), Associate Professor of Department of Fire Fighting and Rescue Operations, Ural Institute of State Fire Service of Emercom of Russia, Yekaterinburg, Russian Federation; Author ID: 182341, ORCID: 0000-0003-4628-7644; e-mail: koksharovab@e1.ru

**Sergey I. OSIPENKO**, Senior Lecturer of Department of Fire Fighting and Rescue Operations, Ural Institute of State Fire Service of Emercom of Russia, Yekaterinburg, Russian Federation; Author ID: 1011020, ORCID: 0000-0003-0117-3547; e-mail: angero07@rambler.ru

**Elena V. GAYNULLINA**, Cand. Sci. (Eng.), Associate Professor, Associate Professor of Department of Chemistry and Combustion Processes, Ural Institute of State Fire Service of Emercom of Russia, Yekaterinburg, Russian Federation; Author ID: 1072896, ORCID: 0000-0002-8278-3111; e-mail: helen\_vaytner@mail.ru

УДК 614.841.33

## Избыточное давление 5 кПа при категорировании помещений по взрывопожарной и пожарной опасности

© А.С. Харламенков✉

Академия Государственной противопожарной службы МЧС России (Россия, 129366, г. Москва, ул. Бориса Галушкина, 4)

### АННОТАЦИЯ

Рассмотрена историческая хронология развития категорирования помещений по взрывопожарной и пожарной опасности. Проведен анализ нормативной литературы и научных публикаций по данному направлению. Даны разъяснения о выборе величины избыточного давления взрыва в качестве критерия отнесения помещений и производств к взрывопожароопасным. Представлена обобщенная информация о типах повреждений промышленных зданий и травмировании людей в результате действия избыточного давления взрыва при аварийных ситуациях. Показаны иные опасные факторы пожара и взрыва, способные привести к гибели человека.

**Ключевые слова:** взрыв; авария; производственный риск; индивидуальный пожарный риск; технологические операции; охрана труда

**Для цитирования:** Харламенков А.С. Избыточное давление 5 кПа при категорировании помещений по взрывопожарной и пожарной опасности // Пожаровзрывобезопасность/Fire and Explosion Safety. 2020. Т. 29. № 3. С. 111–118.

✉ Харламенков Александр Сергеевич, e-mail: h\_a\_s@live.ru

## Overpressure of 5 kPa to be considered for classifying premises by fire and explosion hazards

© Aleksandr S. Kharlamenkov✉

State Fire Academy of Emercom of Russia (Borisa Galushkina St., 4, Moscow, 129366, Russian Federation)

### ABSTRACT

The historical records regarding classification of premises by explosion and fire hazards have been reviewed. The analysis of regulatory documents and scientific publications on this subject has been carried out. The clarification on selecting the explosion overpressure value as a criterion for classifying premises and production facilities as explosive and fire hazardous ones is provided. The synthesized information on types of industrial building damages and injuries to people due to explosion overpressure in emergencies is presented. Other fire and explosion hazards that can result in human death are described.

**Keywords:** explosion; emergency; operational risk; individual fire risk; process operations; labor safety

**For citation:** Kharlamenkov A.S. Overpressure of five kPa to be considered for classifying premises by fire and explosion hazards. *Pozharovzryvobezопасnost/Fire and Explosion Safety*. 2020; 29(3):111-118.

✉ Aleksandr Sergeevich Kharlamenkov, e-mail: h\_a\_s@live.ru



### ВОПРОС:

Большинству проектировщиков и специалистов в области обеспечения пожарной безопасности известно, что производственные и складские помещения (здания) делятся на категории А, Б, В1–В4, Г, Д. Такая классификация необходима для установления нормативных требований пожарной безопасности к объектам защиты, направленных на предотвращение возможности развития пожара и обеспечение противопожарной защиты людей и имущества в случае его возникновения. Реализация этих норм осуществляется путем выбора вариантов планировки

и застройки, этажности, площадей, размещения помещений внутри здания, конструктивных решений и инженерного оборудования.

Особого внимания заслуживают помещения, относящиеся к категориям А и Б, где помимо риска возникновения пожара присутствует высокая вероятность взрыва. Поэтому и персонал, и конструктивные элементы таких зданий могут быть подвержены значительной опасности.

Важным критерием отнесения помещения к категории А или Б является расчетное избыточное давление взрыва  $\Delta P$ , превышающее 5 кПа, достижение которого возможно при аварии

с максимальным значением величины  $G$ , равной произведению годовой частоты реализации этого варианта  $Q_w$  и расчетного  $\Delta P$ .

На основании значения  $\Delta P$  проектировщик определяет категорию помещения (А или Б), а также последующие объемно-планировочные, конструктивные решения и производит выбор технических средств, позволяющих ограничить распространение пожара за пределы очага и обеспечить эвакуацию людей в безопасную зону.

Если же расчетное значение давления окажется меньше указанной выше величины, то помещение автоматически будет оцениваться с позиции угрозы возникновения пожара в зависимости от удельной пожарной нагрузки. В таком случае выбор будет происходить между категориями В1–В4, а это, в свою очередь, повлияет на все последующие проектно-изыскательские работы и стоимость строительства. В таких зданиях не исключена возможность возникновения взрыва в случае аварийной ситуации, но с меньшим избыточным давлением.

Из этого следует резонный вопрос: почему именно 5 кПа выбрано в качестве граничного значения, разделяющего категории взрывопожароопасных и пожароопасных помещений?

#### ОТВЕТ:

Для ответа на данный вопрос потребуется выполнить анализ исторического развития самой классификации помещений по взрывопожароопасности и определить зоны влияния такого параметра, как избыточное давление взрыва.

Первый вариант категорирования помещений, а точнее производств, дошедший до нашего времени, был представлен в книге инженера П.Н. Иванова «Временные иллюстрированные строительно-противопожарные нормы для промышленных и складских сооружений» [1], изданной в 1936–1938 гг. в двух редакциях. Далее, с 1939 до 2009 г., основная классификация помещений претерпевала определенные изменения с учетом активно развивающейся промышленности. Наибольшие преобразования происходили именно с определением категорий А и Б, которые для удобства сведены в табл. 1.

Из данных табл. 1 видно, что категорирование промышленных помещений (производств) за 80-летний период (1939–2019 гг.) претерпело три значительных изменения. К 1951 г. изменились пределы температуры вспышки  $t_{всп}$  веществ, являющейся одним из основных критериев отнесения производств к взрывопожароопасным. С 1972 г. введены дополнительные критерии — «5 % объема помещения» и «время образования взрывоопасной смеси менее 1 ч», которые сохранились в методике оценки классов взрывоопасных зон в соответствии с Правилами устройства электроустановок

(ПУЭ)<sup>1</sup> и определении зоны класса О по Федеральному закону «Технический регламент о требованиях пожарной безопасности» от 22 июля 2008 г. № 123-ФЗ<sup>2</sup>. И начиная с 1986 г. вышеприведенные критерии были заменены на новый критерий — «расчетное избыточное давление взрыва в помещении — 5 кПа», который вошел в СП 423.1325800.2018 «Электроустановки низковольтных зданий и сооружений. Правила проектирования во взрывоопасных зонах»<sup>3</sup> (аналог гл. 7.3 ПУЭ<sup>1</sup>). Поэтому величина  $\Delta P$  оказывает непосредственное влияние на оценку размеров взрывоопасных зон, а значит, и на выбор соответствующего взрывозащищенного электрооборудования.

На основании указанных фактов требуется достаточно рациональное объяснение выбора величины  $\Delta P = 5$  кПа в качестве критерия, который напрямую влияет на конечную стоимость объекта.

Хотелось бы отметить, что существуют различные способы снижения  $\Delta P$ , которые позволяют расчетным путем снизить взрывопожароопасность производства, и сама по себе величина  $\Delta P > 5$  кПа не является приговором. Ее можно уменьшить до приемлемых значений за счет ограничения массы выбрасываемых при расчетной аварии горючих газов (ГГ) или паров легковоспламеняющихся и горючих жидкостей (ЛВЖ и ГЖ), а также через определение (по прил. Д<sup>4</sup>, а не по табл. А.1) коэффициента  $Z$  участия горючих газов и паров в горении.

Если есть возможность снижения величины  $\Delta P$  на данной стадии, можно воспользоваться инженерными решениями, позволяющими внести изменения в ход выполняемых расчетов. Например, применение аварийной вентиляции с требуемой кратностью, уменьшение объемов емкостей с горючим веществом, геометрических размеров помещений, установка бортиков, поддонов, приемков и другие меры для уменьшения площади испарения пролитой ЛВЖ или ГЖ<sup>5, 6</sup>.

<sup>1</sup> Правила устройства электроустановок (ПУЭ). 6-е изд. М. : Энергоатомиздат, 1986.

<sup>2</sup> Технический регламент о требованиях пожарной безопасности (в ред. от 27.12.2018) : Федер. закон РФ от 22.07.2008 № 123-ФЗ; принят Гос. Думой 04.07.2008; одобр. Сов. Федерации 11.07.2008 // Собр. законодательства РФ. 2008. № 30 (ч. I), ст. 3579.

<sup>3</sup> СП 423.1325800.2018. Электроустановки низковольтных зданий и сооружений. Правила проектирования во взрывоопасных зонах. Введ. 25.06.2019. М. : Минстрой России, 2019.

<sup>4</sup> СП 12.13130.2009. Определение категорий помещений, зданий и наружных установок по взрывопожарной и пожарной опасности (с изм. № 1). Введ. 01.05.2009. М. : ФГУ ВНИИПО МЧС России, 2009.

<sup>5</sup> СП 56.13330.2011. Производственные здания. Актуализированная редакция СНиП 31-03-2001 (с Изменениями № 1, 2, 3) (в ред. от 23.05.2020). Введ. 20.05.2011. М. : Минрегион России, 2020.

<sup>6</sup> Правила промышленной безопасности складов нефти и нефтепродуктов (в ред. 15.01.2018). Введ. 03.06.2017. М. : Ростехнадзор, 2017.

**Таблица 1.** Исторические изменения в категорировании промышленных помещений (производств) по взрывопожароопасности

Нормативный документ	Категория взрывопожароопасных помещений (производств)		
	А	Б	Е
Временные иллюстрированные строительно-противопожарные нормы [1]	1) Газообразные вещества, дающие в смеси с воздухом вспышку или взрыв; 2) ЛВЖ с $t_{всп} \leq 45 \text{ }^\circ\text{C}$ (по прибору Абель-Пенского) при нормальном давлении (эфир, сероуглерод, бензин, ацетон и др.); 3) твердые вещества, самовоспламеняющиеся на воздухе при воздействии воды, выделяющие взрывоопасные газы и разлагающие воду со взрывом (фосфор, карбид кальция, металлический натрий и др.). С примерами производств	1) ГЖ с $t_{всп} > 45 \text{ }^\circ\text{C}$ (по прибору Мартенса-Пенского) при нормальном давлении; 2) твердые вещества, при обработке которых выделяется взрывоопасная пыль (мучная, сахарная и др.); 3) волокнистые вещества: хлопок, пенька, вата и др. (первичная обработка). С примерами производств	—
Общесоюзные противопожарные нормы строительного проектирования промышленных предприятий (ОСТ 90015–39)			
Противопожарные нормы строительного проектирования промышленных предприятий и населенных мест: НСП 102-51; НСП 102-54	1) Вещества, воспламенение или взрыв которых могут последовать в результате воздействия воды или кислорода воздуха; 2) жидкости с $t_{всп} \leq 28 \text{ }^\circ\text{C}$ ; 3) горючие газы (ГГ) с нижним концентрационным пределом воспламенения (НКПВ) менее 10 % к объему воздуха в количествах, которые могут образовывать с воздухом взрывоопасные смеси (ВС). С примерами производств. Добавлено категорирование складов	1) Жидкости с $t_{всп}$ выше $28 \text{ }^\circ\text{C}$ и до $120 \text{ }^\circ\text{C}$ ; 2) ГГ с НКПВ более 10 % к объему воздуха в количествах, которые могут образовывать с воздухом ВС; 3) горючие волокна и пыли (ГВ и ГП) во взвешенном состоянии, способные образовывать с воздухом ВС. С примерами производств	—
Строительные нормы и правила: СНиП II-В.7-54; СНиП II-М.2-62			
Строительные нормы и правила СНиП II-М.2-72* совместно с Указаниями по определению категории производств (СН 463-74)	1) ГГ с НКПВ 10 % и менее к объему воздуха и/или жидкости с $t_{всп} \leq 28 \text{ }^\circ\text{C}$ при условии, что указанные газы и жидкости могут образовывать ВС в объеме, превышающем 5 % объема помещения, а их время образования в этом объеме составляет менее 1 ч; 2) вещества, способные взрываться и гореть при взаимодействии с водой, кислородом или друг с другом. Без примеров производств	1) ГГ с НКПВ более 10 % к объему воздуха, в количествах, которые могут образовывать с воздухом ВС; 2) жидкости с $t_{всп}$ выше $28 \text{ }^\circ\text{C}$ до $61 \text{ }^\circ\text{C}$ включительно; 3) жидкости, нагретые выше температуры вспышки; 4) ГП и ГВ с НКПВ $65 \text{ г/м}^3$ и менее к объему воздуха При условии, что указанные газы, жидкости и пыли могут образовывать ВС в объеме, превышающем 5 % объема помещения. Без примеров производств	1) ГГ без жидкой фазы и взрывоопасной пыли, образующие с воздухом ВС в объеме более 5 % объема помещения, где возможен только взрыв без последующего горения; 2) вещества, способные взрываться и гореть при взаимодействии с водой, кислородом или друг с другом без последующего горения

Нормативный документ	Категория взрывопожароопасных помещений (производств)		
	А	Б	Е
Общесоюзные нормы технологического проектирования (ОНТП 24-86) Нормы ГПС МВД России: НПБ 105-95; НПБ 105-03* ГОСТ Р 12.3.047–98; ГОСТ Р 12.3.047–2012 <sup>7</sup> СП 12.13130.2009 <sup>4</sup>	1) ГГ, ЛВЖ с $t_{всп} \leq 28$ °С в таком количестве, что могут образовывать взрывоопасные парогазовоздушные смеси, при воспламенении которых развивается расчетное избыточное давление взрыва в помещении, превышающее 5 кПа; 2) вещества, способные взрываться и гореть при взаимодействии с водой, кислородом или друг с другом в таком количестве, что расчетное избыточное давление взрыва в помещении превышает 5 кПа. Без примеров производств	1) ГП или ГВ, ЛВЖ с $t_{всп} > 28$ °С, ГЖ в таком количестве, что могут образовывать взрывоопасные пылевоздушные или паровоздушные смеси, при воспламенении которых развивается расчетное избыточное давление взрыва в помещении, превышающее 5 кПа. Без примеров производств	—
* НПБ 105-03. Определение категорий помещений, зданий и наружных установок по взрывопожарной и пожарной опасности. Введ. 01.08.2003. М. : ФГУ ВНИИПО МЧС России, 2003.			

При оценке категорий помещений также следует руководствоваться действующими перечнями, правилами и рекомендациями различных министерств и ведомств РФ. Данные документы обычно составляются на базе накопленного опыта и статистических данных, полученных в ходе эксплуатации промышленных зданий и сооружений.

Величина избыточного давления взрыва влияет на последующий анализ возможных разрушений зданий и сооружений, которые следует рассматривать как дополнительный фактор развития и распространения пожара. Примеры типичных предельно допустимых значений  $\Delta P$  с точки зрения повреждения зданий приводятся в табл. А.4 ГОСТ Р 12.3.047–2012 «Пожарная безопасность технологических процессов. Общие требования. Методы контроля»<sup>7</sup> и табл. П 4.1 Методики определения расчетных величин пожарного риска на производственных объектах<sup>8</sup>. Из этих документов можно сделать вывод о том, что значительные повреждения и разрушения зданий имеют место при величинах  $\Delta P > 12$  кПа. До этого значения существует только угроза разрушения остекления. Исходя из данных показателей, не следует переживать за целостность структурных элементов здания при меньших давлениях, в том числе и при 5 кПа. Однако этот вывод не отражает реальную картину возможных последствий.

<sup>7</sup> ГОСТ Р 12.3.047–2012. Пожарная безопасность технологических процессов. Общие требования. Методы контроля : введ. 01.01.2014. М. : Стандартиформ, 2014.

<sup>8</sup> Методика определения расчетных величин пожарного риска на производственных объектах (с изм. на 14.12.2010) : приказ МЧС России от 10.07.2009 № 404; введ. 10.07.2009 // Пожарная безопасность. 2009. № 3.

Например, в пособии<sup>9</sup> указано следующее: «Из выполненных многочисленных расчетов по динамической несущей способности конструкций насосных и компрессорных следует, что снижение давления от внутреннего взрыва до уровня 5 кПа проблему взрывоопасности этих зданий не решает, так как при этом возможно разрушение практически всех несущих и ограждающих конструкций (рядовых панелей стен, плит покрытия, стропильных балок и пр.). При снижении давления внутри здания компрессорной конструкции до 3 кПа разрушаются только рядовые панели стен. Прочность же остальных рассмотренных выше конструкций и узлов их крепления достаточна для восприятия нагрузок от аварийного взрыва».

Аналогичный вывод можно сделать на основе изучения другой научной литературы. Обобщенные данные из различных источников<sup>10</sup> [2–8] по видам воздействия  $\Delta P$  на структурные элементы здания сведены в табл. 2. Данные табл. 2 показывают, что при  $\Delta P = 5...10$  кПа может происходить значительное повреждение стен, перегородок, панелей и плит помещений. Нарушение их целостности способно привести к обрыву поддерживающих конструкций электропроводки, трубопроводов и другого инженерного оборудования, создающего угрозу развития следующей за взрывом пожароопасной ситуации. Для исключения подобного сценария и ограничения давления  $\Delta P$  до величин 3...5 кПа следует

<sup>9</sup> Пособие по обследованию и проектированию зданий и сооружений, подверженных воздействию взрывных нагрузок. М. : АО «ЦНИИПромзданий», 2000. 121 с.

<sup>10</sup> Общие правила взрывобезопасности для взрывопожароопасных химических, нефтехимических и нефтеперерабатывающих производств (с изм. на 26.11.2015). Введ. 10.12.2013. М. : Ростехнадзор, 2013.

**Таблица 2.** Виды воздействия избыточного давления взрыва на структурные элементы промышленных зданий и сооружений<sup>10</sup> [2–8]

Условная степень повреждения (разрушения) здания или сооружения	Тип поврежденных (разрушенных) структурных элементов здания	Избыточное давление взрыва $\Delta P$ , кПа
Малая		До 5
	Повреждение остекления менее 5 %	0,2...0,3
	Заполнение оконных и дверных проемов	0,4...1,8
	Повреждение 5 % оконных проемов	0,7...1,0
	Повреждение 50 % оконных проемов	1,4...3,0
	Повреждение 90 % оконных проемов	3,4...6,8
	Панели стен из легких бетонов (частично)	0,8...2,0
	Штукатурка стен и потолков (частично)	1,4...3,0
	Настенная плитка, легкие перегородки, столярные изделия	3,0...5,0
	Вскрытие предохранительных (легкосбрасываемых) конструкций	3,0...5,0
	Каменные (кирпичные и блочные) стены (частично)	1,0...4,0
	Железобетонные плиты (частично)	2,0...10,0
	Стропильные балки и фермы (частично)	2,5...12,0
Средняя		5...50
	Колонны каркаса (частично)	5,0...20,0
	Металлические панели, черепица, деревянные панели	6,8...13,8
	Кирпичные стены, кровля, стальные конструкции и каркасы (частично)	12,0...14,0
	Обрушение стен из неармированного бетона или шлакоблока, кровли	13,8...20,7
	Разрушение 50 % кирпичной кладки	Более 17,2
	Деформация и обрушение стального каркаса промышленных зданий	20,6...30,0
	Разрыв резервуаров для хранения нефтепродуктов	20,7...27,6
	Смещение несущих конструкций трубопровода, его деформация и обрыв	28,0...40,0
	Деревянные опорные стойки	34,5
Сильная		50...100
	Разрушение зданий из кирпича	34,5...48,3
	Разрушение 50 % промышленных зданий	53,0
	Разрушение 50...75 % стен зданий толщиной 1,5 кирпича	68,5...80,0
	Смещение резервуара цилиндрической формы, выход из строя труб	50...100
	Опрокидывание и снос загруженных вагонов, емкостей, резервуаров	70...90
Полная		более 100
	Полное разрушение зданий	100...260

предусмотреть установку предохранительных (легкобрасываемых) конструкций. Обычно их роль выполняет остекление оконных проемов, площадь которого по СП 56.13330.2011 «Производственные здания»<sup>5</sup> должна быть не менее 0,05 м<sup>2</sup> на 1 м<sup>3</sup> объема помещения категории А и не менее 0,03 м<sup>2</sup> на 1 м<sup>3</sup> помещения категории Б. Для разрушения оконного стекла размерами 1×1 м и толщиной 4 мм необходимо давление  $\Delta P = 4,8$  кПа, а толщиной 5 мм —  $\Delta P = 6,2...7,6$  кПа [3]. Этого вполне достаточно, чтобы исключить негативное воздействие избыточного давления на другие конструкции здания. Таким образом, принятое в нормах давление  $\Delta P > 5$  кПа для категорирования помещений по взрыво-

пожароопасности, с позиции ограничения распространения пожара и сохранения целостности здания, можно считать вполне обоснованным.

Еще в ГОСТ Р 12.3.047–2012 «Пожарная безопасность технологических процессов. Общие требования. Методы контроля»<sup>7</sup> и Методике<sup>8</sup> указана величина избыточного давления 5 кПа в качестве нижнего порога повреждения человека волной давления. При более тщательном изучении литературы и эта величина оказывается немногим заниженной, и в большинстве случаев опасным считается  $\Delta P > 10$  кПа<sup>9</sup> [2–4]. Сводная табл. 3 по видам воздействия избыточного давления на организм человека представлена ниже.

**Таблица 3.** Воздействие волны давления на организм человека<sup>9</sup> [2–4, 6, 9]

Тип воздействия	Характер воздействия на организм	Избыточное давление взрыва $\Delta P$ , кПа
Прямое	Раздражающий шум (137 дБ)	0,14
	Громкий шум (143 дБ)	0,28
	Получение травмы маловероятно	До 4,8
	Нижний порог повреждения человека волной давления	7...10
	Нижний предел безопасности людей на открытой местности (соответствует 0,1 атм = 0,1 кгс/см <sup>2</sup> — 1-й технической атмосфере)	9,8
	5 % — вероятность получения баротравм	10
	Порог разрыва барабанной перепонки	13,8
	10 % — вероятность получения баротравм	15
	20 % — вероятность смертельного исхода для человека в здании	21
	50 % — вероятность разрыва барабанной перепонки	34,5...48,3
	Легкая контузия, возможны вывихи и ушибы	20...40
	50 % — вероятность смертельного исхода для человека в здании	35
	25 % — вероятность получения баротравм	35
	Вывихи конечностей, контузия головного мозга, повреждение органов слуха, кровотечения из носа и ушей	40...60
	Тяжелые контузии и травмы, контузия всего организма, переломы костей, кровотечения из носа и ушей, возможны внутренние кровотечения и повреждения внутренних органов	60...100
	50 % — вероятность получения баротравм	65
	90 % — вероятность разрыва барабанной перепонки	68,9...103
	100 % — смертности для человека в здании	70
	Порог для легочного кровотечения	82...103
	100 % — вероятность получения баротравм	100
	Разрывы внутренних органов	Более 100
	50 % — вероятность гибели от легочного кровотечения	138...172
	90 % — вероятность гибели от легочного кровотечения	207...241
Немедленная смерть от взрыва	Более 480	

Тип воздействия	Характер воздействия на организм	Избыточное давление взрыва $\Delta P$ , кПа
Косвенное	Диапазон минимально возможных поражений человека обломками зданий	2,7
	Диапазон от легких до серьезных травм от летящего стекла и других элементов здания	6,8...55,4
	Незначительные повреждения кожных покровов осколками стекла	6,8...13,8
	Человек сбит с ног ударной волной (травма от падения)	10...20
	Возможен смертельный исход от удара о препятствие	14
	50 % – вероятность получения серьезных ран от осколков стекла	27,5
	100 % – вероятность получения серьезных ран от осколков стекла	55
	Человек будет отброшен на некоторое расстояние	55...110
	Порог порезов кожи летящих осколков здания	69...138
	50 % – вероятность гибели от летящих осколков здания	280...340
	100 % – вероятность гибели от летящих осколков здания	480...690

Конечно, необходимо учитывать и другие факторы, увеличивающие или уменьшающие последствия взрыва на тело человека. К ним можно отнести: расстояние до места взрыва; наличие препятствий на пути прохождения волны давления; импульс волны давления; интенсивность теплового излучения; воздействие высокотемпературных продуктов сгорания газо- или паровоздушной смеси.

В большинстве случаев сочетание этих факторов позволяет определить реальную угрозу для людей с использованием пробит-функций  $Pr$  и последующего определения условной вероятности поражения человека при реализации  $j$ -го сценария развития аварии<sup>4, 8</sup>. Тем не менее при значениях  $\Delta P \leq 10$  кПа в большей степени можно говорить не о прямом, а о косвенном воздействии волны давления. Оно, в первую очередь, связано с летящими осколками стекла и других мелких элементов интерьера (болты, шурупы, гвозди и т.п.). Поэтому

границу  $\Delta P = 5$  кПа следует рассматривать с позиции косвенных повреждений, вызывающих легкие травмы, а не прямых, связанных с волной давления. При несвоевременном оказании человеку медицинской помощи и эвакуации с места пожара такие травмы могут привести к его гибели.

Оценка индивидуального пожарного риска на производственных объектах<sup>9</sup> включает в себя построение сценариев, где в результате воздействия опасных факторов пожара на человека (в том числе от сопутствующих проявлений) может наступить летальный исход<sup>7</sup>. Таким образом, учитывая опасность гибели людей от косвенного поражения волной давления, установленное нормами<sup>4</sup>, <sup>7</sup> значение  $\Delta P > 5$  кПа можно считать обоснованным и принять за критерий оценки взрывопожароопасности помещений (производств).

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Иванов П.Н. Временные иллюстрированные строительно-противопожарные нормы для промышленных и складских сооружений. М.–Л. : Гострансиздат, 1936. 216 с.
2. Козлитин А.М. Вероятностные методы анализа последствий фугасного воздействия взрыва на человека, технологическое оборудование, здания, сооружения при аварийных ситуациях на предприятиях нефтегазовой отрасли // Управление промышленной и экологической безопасностью производственных объектов на основе риска. Саратов : СГТУ, 2005. С. 16–43.
3. Mannan S. Lee's loss prevention in the process industries. Hazard identification, assessment and control. Vol. 1. Third Edition. Butterworth-Heinemann, 2005. 3680 p. DOI: 10.1016/B978-0-7506-7555-0.X5081-6
4. Louvar J.F., Crowl D.A. Chemical process safety. Fundamentals with applications. Third Edition. Westford : Prentice Hall, 2011. 752 p.
5. Jeffries R.M., Gould L., Anastasiou D., Pottrill R. Derivation of fatality probability functions for occupants of buildings subject to blast loads. Phase 4. Health and Safety Executive (HSE), 1997. 340 p.
6. Dagdougui H., Sacile R., Bersani C., Ouammi A. Hydrogen infrastructure for energy applications. Production, storage, distribution and safety. Academic Press, 2018. 166 p. DOI: 10.1016/C2016-0-03214-X
7. Samie N.N. Practical engineering management of offshore oil and gas platforms. Gulf Professional Publishing, 2016. 574 p. DOI: 10.1016/C2014-0-04721-1
8. Nolan D. Handbook of fire and explosion protection engineering principles for oil, gas, chemical, and related facilities.

Fourth Edition. Gulf Professional Publishing, 2019. 522 p. DOI: 10.1016/C2017-0-04314-8

9. Major Hazard Control. A Practical Manual. An ILO Contribution to the International Programme on Chemical Safety of UNEP, ILO, WHO (IPCS). Geneva : International Labour Office, 1988. 296 p.

## REFERENCES

1. Ivanov P.N. *Temporary illustrated constructional fire prevention regulations for industrial and warehouse facilities*. Moscow-Leningrad, Gostransizdat Publ., 1936; 216. (rus.).

2. Kozlitin A.M. Probabilistic methods of analysis of the consequences of a high-explosive impact on human, technological equipment, buildings, structures in emergencies at enterprises of the oil and gas industry. *Risk-based management of industrial and environmental safety of production facilities*. Saratov, SSTU Publ., 2005; 16-43. (rus.).

3. Mannan S. *Lee's Loss Prevention in the Process Industries. Hazard Identification, Assessment and Control. Vol. 1. Third Edition*. Butterworth-Heinemann, 2005; 3680. DOI: 10.1016/B978-0-7506-7555-0.X5081-6

4. Louvar J.F., Crowl D.A. *Chemical Process Safety. Fundamentals with Applications. Third Edition*. Westford, Prentice Hall, 2011; 752.

5. Jeffries R.M., Gould L., Anastasiou D., Pottrill R. *Derivation of Fatality Probability Functions for Occupants of Buildings Subject to Blast Loads. Phase 4*. Health and Safety Executive (HSE), 1997; 340.

6. Dagdougui H., Sacile R., Bersani C., Ouammi A. *Hydrogen Infrastructure for Energy Applications. Production, Stor-*

*age, Distribution and Safety*. Academic Press, 2018; 166. DOI: 10.1016/C2016-0-03214-X

7. Samie N.N. *Practical Engineering Management of Offshore Oil and Gas Platforms*. Gulf Professional Publishing, 2016; 574. DOI: 10.1016/C2014-0-04721-1

8. Nolan D. *Handbook of Fire and Explosion Protection Engineering Principles for Oil, Gas, Chemical, and Related Facilities. Fourth Edition*. Gulf Professional Publishing, 2019; 522. DOI: 10.1016/C2017-0-04314-8

9. Major Hazard Control. A Practical Manual. An ILO Contribution to the International Programme on Chemical Safety of UNEP, ILO, WHO (IPCS). Geneva, International Labour Office, 1988; 296.

Материал поступил в редакцию 20.05.2020

Received May 20, 2020

## Информация об авторе

**ХАРЛАМЕНКОВ Александр Сергеевич**, старший преподаватель кафедры специальной электротехники, автоматизированных систем и связи, Академия ГПС МЧС России, г. Москва, Российская Федерация; Author ID: 763967; e-mail: h\_a\_s@live.ru

## Information about the author

**Aleksandr S. KHARLAMENKOV**, Senior Lecturer of Department of Special Electrical Engineering, Automation Systems and Communication, State Fire Academy of Emercom of Russia; Moscow, Russian Federation; Author ID: 763967, e-mail: h\_a\_s@live.ru

## ПРАВИЛА ДЛЯ АВТОРОВ!

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

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

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

Редакция просит авторов при подготовке рукописи руководствоваться изложенными ниже правилами.

**1.** Статья и сопутствующие ей материалы должны быть направлены через электронную редакцию по адресу [info@fire-smi.ru](mailto: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](http://www.fire-smi.ru).

Материал статьи должен излагаться в следующем порядке.

**2.1.** Номер УДК (универсальная десятичная классификация).

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

**2.3.** Информация об авторах.

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

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

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

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

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

**2.3.3.** ORCID, Researcher ID, Scopus Author ID.

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

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

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

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

Выводы могут сопровождаться рекомендациями, оценками, предложениями, гипотезами, описанными в работе.

Текст должен быть связным; излагаемые положения должны логично вытекать одно из другого.

Сокращения и условные обозначения, кроме общеупотребительных, следует применять в исключительных случаях или давать их расшифровку и определение при первом упоминании в тексте резюме.

В авторское резюме не следует включать схемы, таблицы, иллюстрации, формулы, а также ссылки на публикации, приведенные в списке литературы к статье.

Для повышения эффективности при онлайн-поиске включите в текст аннотации ключевые слова и термины из основного текста и заглавия статьи.

**2.5.** Ключевые слова на русском и английском языках (не менее 5 слов или коротких словосочетаний). Они указываются через точку с запятой. Недопустимо в качестве ключевых слов использовать термины общего характера (например, проблема, решение и т.п.), не являющиеся специфической характеристикой публикации. 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 % об общего количества ссылок. Не более половины от оставшихся 60 % должны составлять статьи из русскоязычных научных журналов, остальное — другие первоисточники на русском языке.

Не менее половины источников должно быть включено в один из ведущих индексов цитирования: Российский индекс научного цитирования eLibrary, Web of Science, Scopus, Chemical Abstracts, MathSciNet, Springer и др. В случае присвоения публикациям цифрового идентификатора объекта (DOI) его необходимо указать, что позволит однозначно идентифицировать объект в базах данных.

Состав источников должен быть актуальным и содержать не менее половины современных (не старше 10 лет) статей из научных журналов или других публикаций.

В списке литературы должно быть не более 30 % источников, автором либо соавтором которых является автор статьи.

Следует обратить внимание на публикации диссертаций (особенно докторских), защищенных в последние годы по ближайшей научной специальности или группе специальностей. Для поиска рекомендуется использовать ресурс <http://www.dissercat.com>.

Не следует включать в список литературы ГОСТы; ссылки на них должны быть даны непосредственно по тексту статьи.

Убедитесь, что указанная в списке литературы информация (Ф.И.О. автора, название книги или журнала, год издания, том, номер и количество (интервал) страниц) верна.

Неопубликованные результаты, проекты документов, личные сообщения и т.п. не следует указывать в списке литературы, но они могут быть упомянуты в тексте.

**2.8. References** (пристайные списки литературы на английском языке). Представление в References только транслитерированного (без перевода) описания недопустимо. Обращаем Ваше внимание, что перевод названия статей следует давать так, как он проходил при их публикации, а перевод названий журналов должен быть официально принятым. Произвольное сокращение названий источников цитирования приведет к невозможности идентифицировать ссылку в электронных базах данных.

При составлении References необходимо следовать схеме:

- ИОФ авторов (транслитерация; для ее написания используйте сайт <http://fotosav.ru/services/transliteration.aspx>, обязательно включив в настройках справа сверху флажок «Американская (для визы США)»; если автор цитируемой статьи имеет свой вариант транслитерации своей фамилии, следует использовать этот вариант);
- заглавие на английском языке — для статьи, транслитерация и перевод названия — для книги;
- название источника (журнала, сборника статей, материалов конференции и т.п.) в транслитерации и на английском языке (курсивом, через косую черту);
- выходные данные;
- указание на язык изложения материала в скобках (например, (in Russian)).

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

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

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

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

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

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

10-я Юбилейная Казахстанская  
международная выставка

Охрана, безопасность, средства спасения,  
противопожарная защита



10 лет  
успеха

Алматы, Казахстан

6 – 8  
октября  
2020

КЦДС «Атакент»



Системы  
и технические  
средства  
видеонаблюдения



Системы  
и средства  
ограничения  
доступа



Системы  
защиты  
периметра



Системы и средства  
обеспечения  
пожарной  
безопасности



Технические  
средства  
обеспечения  
безопасности

РЕКЛАМА

[www.securex.kz](http://www.securex.kz)

Организаторы:



ТОО "Iteca" (для стран СНГ и международных компаний)  
Тел.: +7 727 258 34 34; E-mail: [julia.palagutina@iteca.kz](mailto:julia.palagutina@iteca.kz)

Атакент Экспо (для казахстанских компаний)  
Тел.: +7 727 275 13 57; E-mail: [atakent.expo@mail.ru](mailto:atakent.expo@mail.ru)





# ИНСТИТУТ КОМПЛЕКСНОЙ БЕЗОПАСНОСТИ В СТРОИТЕЛЬСТВЕ

Национальный исследовательский  
Московский государственный  
строительный университет

Научно-  
исследовательские  
и сертификационные  
испытания:

- ◆ железобетонных конструкций
- ◆ противопожарных преград
- ◆ легкобрасываемых конструкций
- ◆ фасадных систем
- ◆ палуб, переборок



Свидетельство о признании испытательной лаборатории  
Аттестат аккредитации № РОСС RU.0001.21AM09 от 24.06.2014 г.  
РМРС № 16.00385.120 от 28.12.2016 г.

Контакты:  
Тел.: 8 (495) 109-05-58  
e-mail: ikbs@mgsu.ru,  
mail@ikbs-mgsu.com

[www.ikbs-mgsu.com](http://www.ikbs-mgsu.com)