

7-2017

**ПОЖ** Издательство  
**НАУКА**

**ПОЖАРОВЗРЫВО-**

**БЕЗОПАСНОСТЬ**



НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКИЙ ЖУРНАЛ

ISSN 2587-6201

ОБ ОБЕСПЕЧЕНИИ  
ПОЖАРНОЙ  
БЕЗОПАСНОСТИ  
ДВУХЭТАЖНЫХ  
ВАГОНОВ

КОМПЛЕКСНАЯ БЕЗОПАСНОСТЬ

пожарная • промышленная • производственная • экологическая



УЧРЕДИТЕЛЬ –

ООО "Издательство "ПОЖНАУКА"

Журнал издается с 1992 г.,  
периодичность выхода –  
12 номеров в год.

СМИ зарегистрировано Федеральной службой  
по надзору в сфере связи, информационных  
технологий и массовых коммуникаций –  
свидетельство ПИ № ФС 77-43615 от 18  
января 2011 г.

РЕДАКЦИЯ:

Зав. редакцией Корольченко О. Н.  
Шеф-редактор Соколова Н. Н.  
Редактор Крылова Л. В.

Адрес редакции:

121357, Россия, г. Москва,  
ул. Вересаева, д. 10.

Адрес для переписки:

121352, Россия, г. Москва, а/я 43.

Тел./факс: (495) 228-09-03,  
8 (909) 940-01-85.

E-mail: info@fire-smi.ru, mail@firepress.ru;  
www.fire-smi.ru, www.firepress.ru.

Журнал включен в перечень ведущих рецензи-  
руемых научных журналов и изданий, реко-  
мендованных ВАК России для публикации  
трудов соискателей ученых степеней, в Рефе-  
ративный журнал и базы данных ВИНТИ РАН,  
в базу данных Российского индекса научного  
цитирования (РИНЦ), в базу данных Russian  
Science Citation Index на платформе Web  
of Science, 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 "Пожаро-  
взрывобезопасность / Fire and Explosion Safety"  
только по согласованию с редакцией.

При цитировании ссылка обязательна.

Авторы и рекламодатели несут ответственность  
за содержание представленных в редакцию  
материалов и публикацию их в открытой  
печати.

Мнение редакции не всегда совпадает с мне-  
нием авторов опубликованных материалов.

Подписано в печать 14.07.2017.

Выход в свет 25.07.2017.

Формат 60x84 1/8. Тираж 2000 экз.

Бумага мелованная матовая.

Печать офсетная.

Отпечатано в типографии ООО "ДИАЛОГ"  
(125315, г. Москва, Ленинградский просп.,  
д. 80, корп. Г).

ГЛАВНЫЙ РЕДАКТОР:

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

ЗАМ. ГЛАВНОГО РЕДАКТОРА:

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

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

РЕДАКЦИОННАЯ КОЛЛЕГИЯ:

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

Барбин Н. М., д. т. н., профессор (Уральский государственный аграрный универ-  
ситет, Екатеринбург, Россия)

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

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

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

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

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

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

Малыгин И. Г., д. т. н., профессор (Институт проблем транспорта им. Н.С. Со-  
ломенко 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., д. т. н., профессор, член-корреспондент НАНПБ, заслуженный  
деятель науки РФ (Академия Государственной противопожарной службы МЧС  
России, Москва, Россия)

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

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

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

Тамразян А. Г., д. т. н., профессор, действительный член ВАНКБ (Национальный  
исследовательский Московский государственный строительный университет,  
Москва, Россия)

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

Холщевников В. В., д. т. н., профессор, академик и почетный член РАЕН, ака-  
демик ВАНКБ, заслуженный работник высшей школы Российской Федерации  
(Национальный исследовательский Московский государственный строительный  
университет, Москва, Россия)

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

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

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

# СОДЕРЖАНИЕ

## БЕЗОПАСНОСТЬ ВЕЩЕСТВ И МАТЕРИАЛОВ

УШКОВ В. А., КОПЫТИН А. В.,  
СЕЛЕЗНЕВ В. А., СМИРНОВ В. А.  
Эффективность броморганических антипиренов  
в эпоксидных композиционных материалах

5

## ЭЛЕКТРОТЕХНИКА

ИВАНОВ А. В., СОРОКИН А. Ю.,  
ИВАХНЮК Г. К., ДЕМЕХИН Ф. В.  
Управление электростатическими свойствами  
жидких углеводородов, модифицированных  
углеродными наноструктурами

16

## БЕЗОПАСНОСТЬ ЗДАНИЙ, СООРУЖЕНИЙ, ОБЪЕКТОВ

МАЛЫГИН И. Г., ТАРАНЦЕВ А. А., ИВАНОВ С. А.,  
НАУМУШКИНА К. А., СТОЛЯРОВА А. А.  
Об обеспечении пожарной безопасности  
двухэтажных вагонов

28

## БЕЗОПАСНОСТЬ ЖИЗНЕДЕЯТЕЛЬНОСТИ

THOMPSON P., NILSSON D., BOYCE K., McGRATH D.  
Модели для расчета эвакуации людей устаревают  
*Перевод; научн. редактирование*  
ХОЛЩЕВНИКОВ В. В.

39

## ЭКОНОМИКА И УПРАВЛЕНИЕ ПОЖАРНОЙ И КОМПЛЕКСНОЙ БЕЗОПАСНОСТЬЮ

ИВАНОВ А. Ю., РЫБИН О. А.  
Информационно-технологические аспекты  
обеспечения пожарной безопасности  
на транспорте

КОЛПАКОВ В. Ф.  
Применение нечеткого моделирования  
для информационной поддержки принятия  
решений при ликвидации лесных пожаров

56

65

## ДИСКУССИИ

О разработке проекта свода правил  
“Здания и комплексы высотные.  
Требования пожарной безопасности”

75

## ВОПРОС – ОТВЕТ

76

# CONTENTS

## SAFETY OF SUBSTANCES AND MATERIALS

USHKOV V. A., KOPYTIN A. V.,  
SELEZNEV V. A., SMIRNOV V. A.  
Efficiency of brominated fire retardants  
in epoxy composites materials

## ELECTRICAL ENGINEERING

IVANOV A. V., SOROKIN A. Yu.,  
IVAKHNYUK G. K., DEMEKHIN F. V.  
Management of electrostatic properties  
hydrocarbon liquids by modification with carbon  
nanostructures

## SAFETY OF BUILDINGS, STRUCTURES, OBJECTS

MALYGIN I. G., TARANTSEV A. A., IVANOV S. A.,  
NAUMUSHKINA K. A., STOLYAROVA A. A.  
On ensuring the fire safety  
of double-decker railway cars

## LIFE SAFETY

THOMPSON P., NILSSON D., BOYCE K., McGRATH D.  
Evacuation models are running out of time  
*Interpretation. Scientific editing by*  
KHOLSHCHEVNIKOV V. V.

## ECONOMICS AND FIRE AND COMPLEX SAFETY CONTROLE

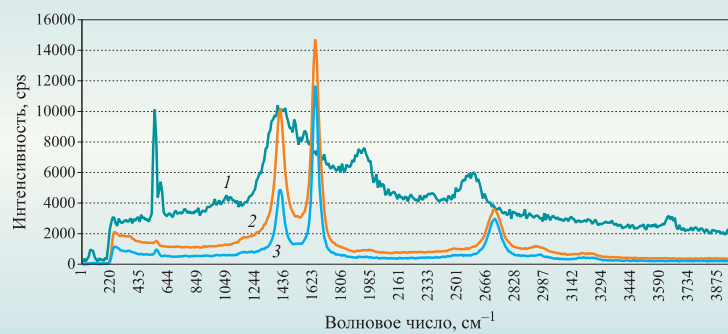
IVANOV A. Yu., RYBIN O. A.  
Information and technological  
aspects of fire safety  
on transport

KOLPAKOV V. F.  
Application of fuzzy modeling  
for information support of decision-making  
in extinguishing forest fires

## DISCUSSION

On the development of the draft set of rules  
“High risebuildings and complexes.  
Fire safety requirements”

## QUESTION – ANSWER



Управление электростатическими свойствами наножидкостей

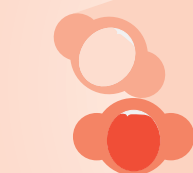


Об обеспечении пожарной безопасности двухэтажных вагонов

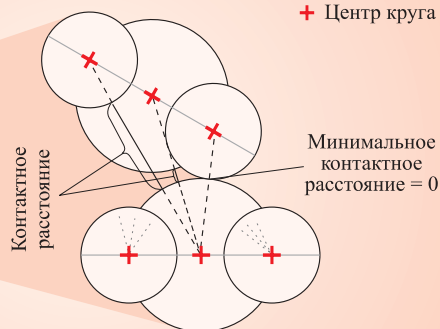
Стр. 16

Стр. 28

Препятствующий человек



Оценивающий человек



Модели для расчета эвакуации людей устаревают



Аспекты обеспечения пожарной безопасности на транспорте

Стр. 39

Стр. 56

Стр. 65



Нечеткое моделирование при ликвидации лесных пожаров



**FOUNDER —**

**"POZHNAUKA" Publishing House, Ltd.**

Journal founded in 1992,  
issued 12 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 77-43615 on January 18, 2011.

**EDITORIAL STAFF:**

Chief of editorial staff **Korolchenko O. N.**

Editorial director **Sokolova N. N.**

Editor **Krylova L. V.**

**Address of Editorial Staff:**

Veresaeva St., 10, Moscow,  
121357, Russia.

**Corresponding to:** Post office box 43,  
Moscow, 121352, Russia.

**Phone/Fax:** (495) 228-09-03,  
8 (909) 940-01-85.

E-mail: [info@fire-smi.ru](mailto:info@fire-smi.ru), [mail@firepress.ru](mailto:mail@firepress.ru);  
[www.fire-smi.ru](http://www.fire-smi.ru), [www.firepress.ru](http://www.firepress.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, in Russian  
Science Citation Index, 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 re-  
produced in any form or by any means without  
the prior permission of the Publishers. Repro-  
ducing 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 14.07.2017.

Date of publication 25.07.2017.

Format is 60x84 1/8.

Printing is 2000 copies.

Chalk-overlay mat paper.

Offset printing.

Printed at "DIALOG", Ltd.

(Leningradskiy Avenue, 80, build. G,  
Moscow, 125315, Russian).

**EDITOR-IN-CHIEF:**

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

**DEPUTY EDITOR-IN-CHIEF:**

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

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

**EDITORIAL BOARD:**

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

**Barbin N. M.**, Dr. Tech. Sci., Professor (Urals State Agrarian University, Yekaterinburg,  
Russia)

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

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

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

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

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

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

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

**Polandov Yu. Kh.**, Dr. Tech. Sci., Professor (Orel State University named after I. Tur-  
genev, Orel, Russia)

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

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

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

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

**Tamrazyan A. G.**, Dr. Tech. Sci., Professor, Full Member of World Academy of Sciences  
for Complex Safety (National Research Moscow State University of Civil Engineering,  
Moscow, Russia)

**Topolskiy N. G.**, Dr. Tech. Sci., 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)

**Kholshchevnikov V. V.**, Dr. Tech. Sci., 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)

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

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

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

**В. А. УШКОВ**, канд. техн. наук, заведующий лабораторией “Современные композиционные строительные материалы”, Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет (Россия, 129337, г. Москва, Ярославское шоссе, 26; e-mail: va.uskov@yandex.ru)

**А. В. КОПЫТИН**, аспирант кафедры “Технология вяжущих веществ и бетонов”, Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет (Россия, 129337, г. Москва, Ярославское шоссе, 26; e-mail: a.kopytin@ktbbeton.com)

**В. А. СЕЛЕЗНЕВ**, аспирант кафедры “Технология вяжущих веществ и бетонов”, Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет (Россия, 129337, г. Москва, Ярославское шоссе, 26; e-mail: va.uskov@yandex.ru)

**В. А. СМЕРНОВ**, канд. техн. наук, ведущий научный сотрудник научно-образовательного центра “Нanomатериалы и нанотехнологии”, Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет (Россия, 129337, г. Москва, Ярославское шоссе, 26; e-mail: smirnov@nocnt.ru)

УДК 699.812;678.06

## ЭФФЕКТИВНОСТЬ БРОМОРГАНИЧЕСКИХ АНТИПИРЕНОВ В ЭПОКСИДНЫХ КОМПОЗИЦИОННЫХ МАТЕРИАЛАХ

Рассмотрено влияние содержания и химической природы промышленных и аддитивных ароматических броморганических антипиренов и реакционноспособных бромсодержащих соединений на термостойкость, воспламеняемость и дымообразующую способность материалов на основе эпоксидных олигомеров. Выявлена корреляция между кислородным индексом и показателем горючести  $K_{cp}$  при испытании методом керамической трубы по ГОСТ 12.1.044–89. Показано, что для получения слабогорючих материалов кислородный индекс должен превышать 31 %. Установлено, что химическое строение ароматических бромсодержащих антипиренов аддитивного типа практически не влияет на горючесть эпоксидных ПКМ. Показано, что оптимальной концентрацией промышленных бромсодержащих антипиренов является 8–10 % масс. Выявлена линейная зависимость кислородного индекса от концентрации брома в исследованных бромсодержащих эпоксидных соединениях.

**Ключевые слова:** бромсодержащий антипирен; горючесть; кислородный индекс; коэффициент дымообразования; термостойкость.

**DOI:** 10.18322/PVB.2017.26.07.5-15

### Состояние проблемы

В строительной индустрии широкое применение получили полимерные композиционные материалы (ПКМ) на основе эпоксидных олигомеров [1–5]. В то же время повышенная горючесть таких материалов сдерживает их использование в строительстве. Одним из наиболее распространенных и эффективных методов снижения горючести эпоксидных ПКМ является применение аддитивных бромсодержащих антипиренов. Это обусловлено прежде всего широким ассортиментом и относительно невысокой стоимостью промышленных марок бромсодержащих антипиренов. К настоящему времени опубликовано большое число работ, в которых изучено влияние различных галогенсодержащих антипиренов на горючесть, технологические и физико-механические свойства полимерных материалов [6–9].

Ряд работ посвящен изучению механизма действия таких антипиренов [10–12]. В то же время в них отмечается, что галогенсодержащие антипирены существенно повышают дымообразующую способность и токсичность продуктов пиролиза и горения ПКМ. Однако работ, направленных на выявление влияния химической природы броморганических антипиренов на воспламеняемость и дымообразующую способность эпоксидных ПКМ, опубликовано крайне мало. В связи с этим целью настоящей работы является выявление влияния содержания и химической природы аддитивных и реакционноспособных броморганических антипиренов на воспламеняемость и дымообразующую способность эпоксидных полимеров. Для этого решались следующие задачи: выявление влияния химической природы броморганических соединений на воспламеняемость, горючесть

и дымообразующую способность эпоксидных композитов; установление зависимости между концентрацией брома и показателями пожарной опасности; выявление корреляции между маломасштабными методами оценки горючести полимерных материалов.

### Материалы и методы

Объектом исследования в работе являлись материалы на основе эпоксидного олигомера ЭД-20 (ГОСТ 10587–84). В качестве антипиренов применяли промышленные марки аддитивных ароматических броморганических соединений, физико-химические свойства которых приведены в табл. 1 (термостойкость соответствует температуре 5 %-ной потери массы при нагревании антипиренов на воздухе со скоростью 5 °С/мин). Для сравнения использовали микрокапсулированные хладон 114В2,  $\text{CCl}_4$ , полифосфат аммония и декабромдифенилоксид (ДБДФО), реакционноспособные галогенсодержащие эпоксидные олигомеры марок Оксиллин-6 (ТУ 6-02-1376–87) и УП-631 (ТУ 2225-020-00203306–96), а также продукты бромирования эпоксидного олигомера ЭД-22, содержащие атомы брома в ароматическом (серия 1) или алифатическом и ароматическом (серия 2) фрагментах молекулы антипирена, и модифицированный анилином диглицидиловый эфир тетрабромдиана. При этом установлено, что концентрация эпоксидных групп и брома в модифицированном анилином диглицидиловом эфире тетрабромдиана линейно снижается с увеличением мольного соотношения УП-631 и анилина (табл. 2).

Кислородный индекс (КИ), температуры воспламенения  $T_v$  и самовоспламенения  $T_{cv}$ , коэффициент дымообразования  $D_m$  в режимах пиролиза и горения эпоксидных ПКМ определяли по ГОСТ 12.1.044–89.

Предельную концентрацию кислорода  $c_{пр}$  и скорость распространения пламени по горизонтальной поверхности  $V_{рп}$  ПКМ при различной концентрации кислорода  $[\text{O}_2]$  в потоке окислителя изучали по методике, описанной в работе [13]. КИ бромсодержащих антипиренов получали экстраполяцией зависимости величины  $1/\text{КИ}$  от степени пропитки прокаленного асбокартона на нулевое содержание наполнителя по методике, приведенной в работе [14]. Термический анализ бромсодержащих антипиренов и ПКМ исследовали с помощью термоаналитического комплекса “DuPont-9900” при нагреве на воздухе со скоростью 20 °С/мин.

### Результаты и их обсуждение

Кислородный индекс промышленных марок аддитивных броморганических антипиренов, как правило, превышает 90 % (для N(2,4,6-трибромфенил)-малеинимида КИ = 65 %), а теплота их сгорания со-

ставляет 9,4–10,8 кДж/кг. При этом температуры начала и 10 %-ной потери массы N(2,4,6-трибромфенил)-малеинимида равны соответственно 200 и 228 °С, хлоргидринового эфира пентабромфенола — 220 и 300 °С и декабромдифенилоксида — 330 и 398 °С.

Влияние химической природы промышленных марок броморганических антипиренов (5,7 % масс.) на воспламеняемость, горючесть и дымообразующую способность эпоксидных композитов, модифицированных синтетическим каучуком СКН-26-1А и наполненных кварцевой мукой (41 % масс.), показано в табл. 3.

Из табл. 3 следует, что ароматические бромсодержащие антипирены снижают горючесть и воспламеняемость эпоксидных ПКМ. Так, КИ композитов возрастает с 21,6 до 27,2–28,8 %, а величина  $c_{пр}$  — с 34 до 36,1–39,6 %. Скорость  $V_{рп}$  при концентрации кислорода в потоке окислителя, равной 45 %, уменьшается с 0,41 до 0,23–0,31 мм/с. Температура  $T_v$ , как правило, снижается на 20 °С, а  $T_{cv}$  составляет 460–480 °С. Коэффициент дымообразования  $D_m$  эпоксидных композитов в режиме пиролиза возрастает незначительно — с 410 до 440–490 м<sup>2</sup>/кг, а в режиме пламенного горения — более чем в 1,4 раза, с 570 до 890–990 м<sup>2</sup>/кг. При этом  $D_m$  в режиме пламенного горения превышает коэффициент дымообразования в режиме пиролиза более чем в 1,3 раза (см. табл. 3). Анализ полученных данных показывает, что химическое строение промышленных марок ароматических бромсодержащих антипиренов аддитивного типа незначительно влияет на горючесть эпоксидных композитов. Так, например, КИ композитов, содержащих 2,4,6-триброманилин, 2,4,6-трибромфенол и глицидный эфир пентабромфенола, равен соответственно 28,0; 28,7 и 28,8 %. С учетом тонкости метода КИ (1 %) эти значения близки.

Кислородный индекс эпоксидных композитов, содержащих промышленный гексахлорбензол, равен 27,1 %. Следует отметить, что очищенный гексахлорбензол, уступая по эффективности пламегасящего действия гексабромбензолу, практически не повышает дымообразующей способности эпоксидных композитов.

Степень очистки и условия производства тетрабромдиана практически не влияют на горючесть эпоксидных материалов (табл. 4).

По нашему мнению, основным фактором, определяющим эффективность бромсодержащих антипиренов, является близость температур начала интенсивного разложения эпоксидного полимера и бромсодержащего соединения. Учитывая, что исследованные антипирены оказывают существенное влияние на термоокислительную стабильность и мало

Таблица 1. Свойства ароматических бромсодержащих антипиренов

Table 1. Properties of aromatic bromine-containing flame retardants

| Вид антипирена<br>Type of flame retardant                                                                 | Структурная формула<br>Structural formula | Молекулярная масса<br>Molecular mass | Содержание брома, %<br>Bromine, % | Температура плавления, °C<br>Melting point, °C | Термостойкость, °C<br>Thermal stability, °C |
|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------|-------------------------------------------|--------------------------------------|-----------------------------------|------------------------------------------------|---------------------------------------------|
| Гексабромбензол<br>(ТУ 6-22-46–80)<br>Hexabromobenzene<br>(TU 6-22-46–80)                                 |                                           | 551,52                               | 85,5                              | 325–326                                        | 265                                         |
| Декабромдифенилоксид<br>(ТУ 6-47-49–95)<br>Decabromo-diphenyloxide<br>(TU 6-47-49–95)                     |                                           | 959,22                               | 82,5                              | 300–304                                        | 392                                         |
| 2,4,6-Триброманилин<br>(ТУ 6-09-07-629–76)<br>2,4,6-Tribromanyline<br>(TU 6-09-07-629–76)                 |                                           | 329,83                               | 72,0                              | 119–120                                        | 200<br>субл.                                |
| Тетрабромдиаминодифенилсульфон<br>Tetrabromo-diamino-diphenylsulfone                                      |                                           | 563,90                               | 56,2                              | 318–320                                        | 350<br>субл.                                |
| N(2,4,6-трибромфенил)-малеинимид<br>N(2,4,6-tribromophenyl)-maleimide                                     |                                           | 409,87                               | 58,0                              | 138–139                                        | 225                                         |
| 2,4,6-Трибромфенол<br>2,4,6-Tribromophenol                                                                |                                           | 330,82                               | 72,0                              | 92–94                                          | 170<br>субл.                                |
| Тетрабромдифенилолпропан<br>(ТУ 6-18-47–85)<br>Tetrabromo-diphenylolpropane<br>(TU 6-18-47–85)            |                                           | 543,88                               | 58,5                              | 178–180                                        | 187                                         |
| Пентабромфенол<br>Pentabromophenol                                                                        |                                           | 488,62                               | 80,9                              | 225–229                                        | 230                                         |
| Глицидный эфир пентабромфенола (ТУ 6-18-22-105–87)<br>Pentabromophenol glycidyl ether (TU 6-18-22-105–87) |                                           | 544,68                               | 72,0                              | 161–163                                        | 285                                         |
| Тетрабромфталевый ангидрид<br>(ТУ 6-22-24–77)<br>Tetrabromo-phthalic anhydride<br>(TU 6-22-24–77)         |                                           | 463,72                               | 67,5                              | 269–280                                        | 270<br>субл.                                |
| Хлоргидриновый эфир пентабромфенола<br>Chlorohydrin pentabromophenol ether                                |                                           | 581,14                               | 68,0                              | 118–120                                        | 285                                         |

вливают на КИ, можно предположить, что они являются антипиренами газофазного действия. Механизм их действия обусловлен как ингибированием радикальных цепей процессов в пламени, так и флегматизацией пламени продуктами разложения бромсодержащих антипиренов.

Следует отметить, что КИ исследованных стеклонеполненных бромсодержащих эпоксидных композиций

**Таблица 2.** Термостойкость модифицированного диглицидилового эфира тетрабромдиана**Table 2.** Thermal stability of the modified diglycidyl ether of tetrabromodiamine

| Показатель<br>Property                                                                                                      | Мольное соотношение олигомера УП-631 и анилина<br>Molar ratio of UP-631 oligomer and aniline |       |       |       |       |
|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----------------------------------------------------------------------------------------------|-------|-------|-------|-------|
|                                                                                                                             | 1:0,2                                                                                        | 1:0,4 | 1:0,6 | 1:0,8 | 1:1   |
| Концентрация, % масс.:<br>Concentration, % by mass:                                                                         |                                                                                              |       |       |       |       |
| эпоксидных групп / of epoxy groups                                                                                          | 9,8                                                                                          | 7,1   | 5,4   | 2,9   | 0,7   |
| брома / of bromine                                                                                                          | 47,4                                                                                         | 46,1  | 45,0  | 43,8  | 42,8  |
| Температура начала интенсивного разложения, °C<br>Temperature of start of intensive decomposition, °C                       | 284                                                                                          | 273   | 272   | 271   | 269   |
| Температура максимальной скорости разложения, °C, на стадии:<br>Temperature of maximal rate of decomposition, °C, at stage: |                                                                                              |       |       |       |       |
| первой / first                                                                                                              | 351                                                                                          | 337   | 327   | 319   | 315   |
| второй / second                                                                                                             | 488                                                                                          | 513   | 520   | 525   | 526   |
| Максимальная скорость разложения, %/мин, на стадии:<br>Maximal rate of decomposition, %/min, at stage:                      |                                                                                              |       |       |       |       |
| первой / first                                                                                                              | 84,4                                                                                         | 115,4 | 173,6 | 196,8 | 245,5 |
| второй / second                                                                                                             | 7,85                                                                                         | 5,43  | 5,04  | 5,2   | 5,52  |
| Потеря массы при 600 °C, %<br>Loss of mass at 600 °C, %                                                                     | 98,69                                                                                        | 99,09 | 97,9  | 98,01 | 99,18 |

**Таблица 3.** Пожарная опасность эпоксидных ПКМ**Table 3.** Fire safety properties of epoxy PMC

| Марка антипирена<br>Type of fire retardant                                                     | $T_{в}, ^\circ\text{C}$<br>$T_{с}, ^\circ\text{C}$ | КИ, %<br>LOI, % | $c_{пр}, \%$<br>$c_r, \%$ | $V_{рп}$ при $[\text{O}_2] = 45 \%$ ,<br>мм/с<br>$V_{fs}$ for $[\text{O}_2] = 45 \%$ ,<br>mm/s | $D_m, \text{m}^2/\text{кг}$ , в режиме<br>$D_m, \text{m}^2/\text{kg}$ , for |                                     |
|------------------------------------------------------------------------------------------------|----------------------------------------------------|-----------------|---------------------------|------------------------------------------------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------|-------------------------------------|
|                                                                                                |                                                    |                 |                           |                                                                                                | пиролиза<br>pyrolysis                                                       | пламенного<br>горения<br>combustion |
| Без антипирена<br>No fire retardant                                                            | 300                                                | 21,6            | 34,0                      | 0,41                                                                                           | 410                                                                         | 570                                 |
| Гексахлорбензол (очищенный)<br>Pure hexachlorobenzene                                          | 290                                                | 27,2            | 37,4                      | 0,35                                                                                           | 470                                                                         | 580                                 |
| Гексабромбензол<br>Hexabromobenzene                                                            | 280                                                | 28,8            | 36,1                      | 0,31                                                                                           | 440                                                                         | 1000                                |
| Декабромдифенилоксид<br>Decabromodiphenyl oxide                                                | 270                                                | 28,2            | 36,8                      | 0,25                                                                                           | 460                                                                         | 900                                 |
| Тетрабромпарахлорил<br>Tetrabrom P-xylene                                                      | 270                                                | 27,9            | 37,9                      | 0,33                                                                                           | 490                                                                         | 890                                 |
| 2,4,6-Триброманилин<br>2,4,6-Tribromaniline                                                    | 300                                                | 28,4            | 36,0                      | 0,33                                                                                           | 480                                                                         | 820                                 |
| N(2,4,6-трибромфенил)малеинимид<br>N(2,4,6-tribromophenyl)maleimide                            | 290                                                | 28,5            | 36,1                      | 0,48                                                                                           | 430                                                                         | 830                                 |
| Пентабромфенол<br>Pentabromophenol                                                             | 280                                                | 28,4            | 38,4                      | 0,24                                                                                           | 460                                                                         | 360                                 |
| 3,5,3',5'-тетрабром-4,4'-диамидифенилсульфон<br>3,5,3',5'-tetrabromo-4,4'-diamidiphenylsulfone | 295                                                | 28,1            | 36,1                      | 0,35                                                                                           | 470                                                                         | 810                                 |
| 2,4,6-Трибромфенол<br>2,4,6-Tribromophenol                                                     | 290                                                | 28,7            | 39,4                      | 0,23                                                                                           | 550                                                                         | 820                                 |
| Тетрабромдифенилпропан<br>Tetrabromodiphenylpropane                                            | 290                                                | 27,2            | 39,6                      | 0,45                                                                                           | —                                                                           | —                                   |
| Тетрабромфталевый ангидрид<br>Tetrabromphthalic anhydride                                      | 260                                                | 28,1            | 38,9                      | 0,36                                                                                           | 490                                                                         | 900                                 |

**Таблица 4.** Показатели горючести эпоксидных материалов  
**Table 4.** Flammability of epoxy-based materials

| Показатель<br>Property                             | Тетрабромдиан<br>Tetrabromobisphenol A |                                             |
|----------------------------------------------------|----------------------------------------|---------------------------------------------|
|                                                    | Львовского<br>завода<br>Lvov plant     | Небит-Дагского<br>завода<br>Nebit-Dag plant |
| Температура плавления, °C<br>Melting point, °C     | 180,05<br>181,54                       | 178,14<br>180,95                            |
| Теплота плавления, кВт/кг<br>Heat of fusion, kW/kg | 51,12<br>54,48                         | 43,13<br>54,97                              |
| Кислородный индекс, %<br>LOI, %                    | 27,2<br>27,4                           | 27,1<br>27,3                                |

Примечание. Над чертой приведены данные для технического тетрабромдиана, под чертой — для очищенного.

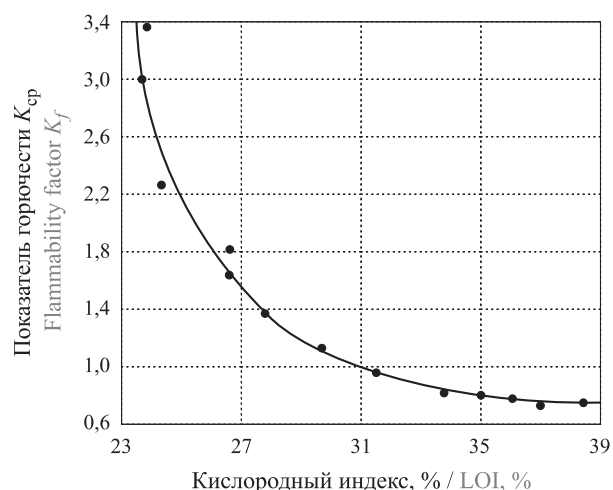
Note. First numbers correspond to technical-grade tetrabromobisphenol A, second ones correspond to purified tetrabromobisphenol A.

позитов хорошо коррелирует с показателем горючести  $K_{cp}$  при испытании по методу керамической трубы (ГОСТ 12.1.044–89) (рис. 1). Из рис. 1 следует, что трудногорючие (слабогорючие) композиты могут быть получены при  $KI \geq 31$  %, а трудновоспламеняющиеся (умеренногорючие) — при  $KI > 26$  %.

С ростом содержания аддитивных броморганических антипиренов закономерно снижается воспламеняемость и горючесть эпоксидных композитов. Так, например, с повышением содержания тетрабромдиана до 9,8 % масс. температура воспламенения ПКМ уменьшается с 300 до 280 °C, а температура самовоспламенения, напротив, возрастает — с 460–470 до 480–490 °C;  $KI$  также увеличивается с 21,6 до 29,2 %. Величина  $D_m$  в режиме пиролиза практически не зависит от содержания антипиренов и составляет 420–440 м<sup>2</sup>/кг, а в режиме пламенного горения возрастает с 570 до 990 м<sup>2</sup>/кг. Зависимость горючести эпоксидных композитов, модифицированных броморганическими соединениями, представлена на рис. 2.

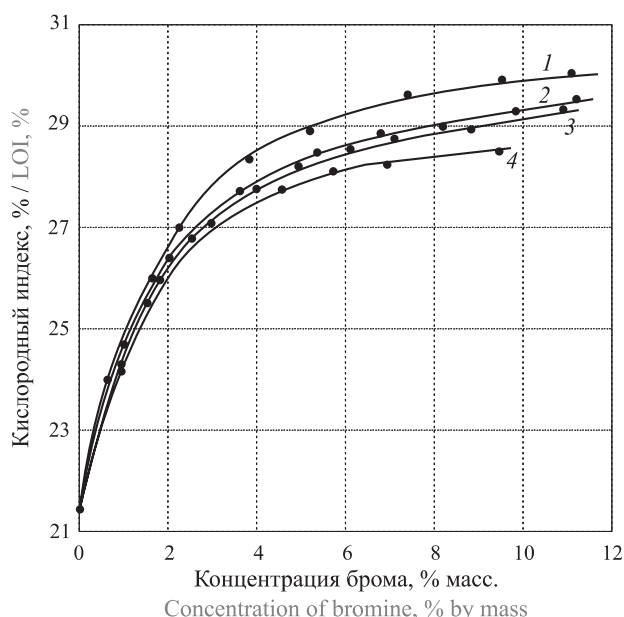
Перспективным направлением снижения горючести эпоксидных ПКМ является применение микрокапсулированных антипиренов. Микрокапсулы, содержащие антипирены, взрывоподобно разрушаются при воздействии повышенных температур или огня, выбрасывая газифицированный пламегасящий агент в зону пламени.

Микрокапсулированные антипирены могут применяться в качестве как порошкового огнегасителя, так и наполнителей ПКМ. Микрокапсулированные антипирены сочетают в себе, с одной стороны, автономную автоматическую безынерционную систему подавления возгорания, а с другой — свойства



**Рис. 1.** Зависимость горючести эпоксидных композитов, модифицированных броморганическими соединениями, при испытании методом керамической трубы от их кислородного индекса

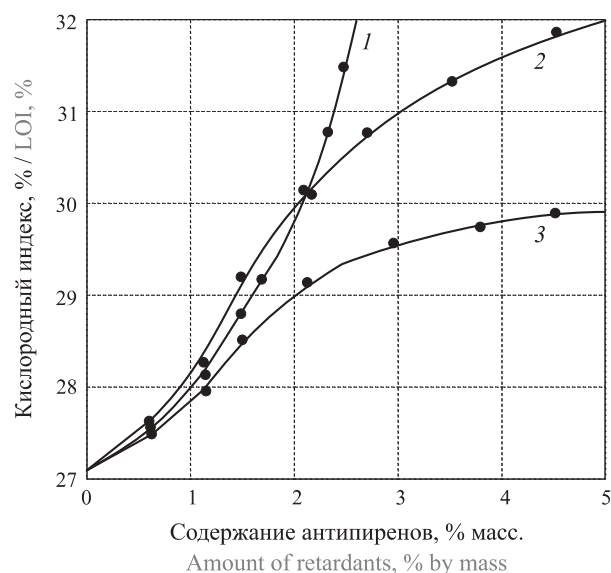
Fig. 1. Dependence between LOI and flammability of epoxy composites modified by bromine-organic compounds (ceramic pipe test method)



**Рис. 2.** Зависимость кислородного индекса эпоксидных композитов, содержащих аддитивные броморганические антипирены, от концентрации брома в материале: 1 — гексабромбензол; 2 — декабромдифенилоксид; 3 — 2,4,6-триброманилин; 4 — N(2,4,6-трибромфенил)малеинимид

Fig. 2. Dependence between concentration of bromine in the material and LOI for epoxy composites with additive bromine-organic fire retardants: 1 — hexabromobenzene; 2 — decabromodiphenyl oxide; 3 — 2,4,6-tribromaniline; 4 — N(2,4,6-tribromophenyl)maleimide

слабогорючего материала. Основное преимущество микрокапсулированных антипиренов — возможность активного подавления источника возгорания (как на поверхности, так и внутри объекта) и ликвидации пожара на начальной стадии развития.



**Рис. 3.** Зависимость кислородного индекса эпоксидных материалов от содержания микрокапсулированных антипиренов: 1 — полифосфат аммония; 2 — хладон 114В2; 3 — четыреххлористый углерод

Fig. 3. Dependence between content of microencapsulated fire retardants and LOI of epoxy materials: 1 — ammonium polyphosphate; 2 — Chladon 114V2; 3 — carbon tetrachloride

В качестве примера на рис. 3 показано влияние содержания микрокапсулированных антипиренов на горючесть эпоксидных материалов.

ДБДФО по эффективности пламегасящего действия превосходит микрокапсулированный ДБДФО. Эффективность микрокапсулированных антипиренов зависит в основном от диаметра микросфер и химической природы использованного антипирена и в меньшей степени — от химической природы оболочки микрокапсулы. Результаты исследования влияния микрокапсулированного ДБДФО (5,85 % масс.) на горючесть эпоксидных композиций, наполненных маршалитом (41,8 % масс.), приведены в табл. 5.

Применение промышленных марок аддитивных броморганических антипиренов позволяет получать эпоксидные композиты с КИ, равным 30–33 %, при концентрации брома 6–8 % масс. Оптимальным содержанием таких антипиренов является 8–10 % масс. При таком содержании броморганических соединений незначительно снижаются прочностные показатели эпоксидных композитов. При содержании 11,5 % масс. ДБДФО, хлоргидринового эфира пентабромфенола или тетрабромдифенилпропана в сочетании с  $\text{Sb}_2\text{O}_3$  при их соотношении, равном 3:1, получены эпоксидные стеклопластики с КИ = 33÷35 % и показателем горючести  $K_{\text{ср}} = 0,85 \div 0,9$  при испытании по методу керамической трубы.

Следует отметить, что аддитивные антипирены в процессе длительной эксплуатации изделий из ПКМ склонны к миграции и выпотеванию на поверхность материалов, что приводит к повышению

**Таблица 5.** Кислородный индекс эпоксидных композиций с ДБДФО

Table 5. LOI of epoxy compositions with decabromodiphenyl oxide

| Вид ДБДФО<br>Type of decabromodiphenyl oxide                                                                                                                                                                      | КИ, %<br>LOI, % |
|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----------------|
| ДБДФО с диаметром частиц 240 мкм<br>DBDPO with a particle diameter of 240 $\mu\text{m}$                                                                                                                           | 36,9            |
| ДБДФО с оболочкой из эпоксидной смолы с диаметром частиц 150–400 мкм<br>DBDPO with a shell of epoxy resin with a particle diameter of 150–400 $\mu\text{m}$                                                       | 32,1            |
| ДБДФО с оболочкой из сополимера стирола и N(2,4,6-трибромфенил)малеинимида с диаметром частиц:<br>DBDPO with a shell of a copolymer of styrene and N(2,4,6-tribromophenyl)-maleimide with a particle diameter of: |                 |
| не менее 150 мкм / at least 150 $\mu\text{m}$                                                                                                                                                                     | 32,1            |
| не более 150 мкм / not more than 150 $\mu\text{m}$                                                                                                                                                                | 32,8            |
| ДБДФО с оболочкой из ароматического полиамида с диаметром частиц 150–400 мкм<br>DBDPO with a shell of an aromatic polyamide with a particle diameter of 150–400 $\mu\text{m}$                                     | 32,1            |
| Хладон 114В2 с оболочкой из поливинилового спирта с диаметром частиц 125–250 мкм<br>Chladon 114V2 with a shell of polyvinyl alcohol with a particle diameter of 125–250 $\mu\text{m}$                             | 28,6            |

воспламеняемости и горючести композитов. В связи с этим в качестве антипиренов предпочтительнее применять реакционноспособные бромсодержащие эпоксидные соединения. В качестве таких соединений в работе использовали бромсодержащий эпоксидный олигомер марки УП-631, хлорсодержащий олигомер марки Оксилон-6, модифицированный анилином олигомер УП-631 и бромированный эпоксидный олигомер ЭД-22.

Термостойкость модифицированного эпоксидного олигомера УП-631 снижается на 6–15 °С с ростом мольного соотношения диглицидилового эфира тетрабромдиана и анилина с 1:0,2 до 1:1 (см. табл. 2). С повышением степени бромирования эпоксидного олигомера ЭД-22 термостойкость исследованных продуктов также снижается (температура начала интенсивного разложения с ростом концентрации брома с 8,1 до 25 % линейно уменьшается с 296 до 249 °С), возрастает скорость и экзотермический эффект разложения олигомера (табл. 6).

Результаты экспериментальных исследований показали, что использованный в работе подход, основанный на тепловой модели пределов горения ПКМ, применим и для оценки эффективности бромсодержащих антипиренов. Для всех исследованных продуктов бромирования эпоксидного олигомера ЭД-22,

**Таблица 6.** Термостойкость бромированного эпоксидного олигомера ЭД-22**Table 6.** Thermal stability of brominated ED-22 oligomer

| Показатель<br>Property                                                                                                                                                             | Содержание брома, % масс.<br>Amount of bromine, % by mass |      |      |       |           |
|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------|------|------|-------|-----------|
|                                                                                                                                                                                    | 8,1                                                       | 10   | 15   | 20    | 25        |
| Концентрация эпоксидных групп, % масс.<br>Concentration of epoxy groups, % by mass                                                                                                 | 19,6                                                      | 16   | 14   | 12    | 9/13,2    |
| Температура начала интенсивного разложения, °C<br>Temperature of start of intensive decomposition, °C                                                                              | 296                                                       | 288  | 275  | 263   | 249/264   |
| Температура максимальной скорости разложения, °C,<br>на стадии:<br>Temperature of maximal rate of decomposition, °C, at stage:                                                     |                                                           |      |      |       |           |
| первой / first                                                                                                                                                                     | 360                                                       | 345  | 335  | 346   | 319/340   |
| второй / second                                                                                                                                                                    | 526                                                       | 522  | 517  | 523   | 563/509   |
| Максимальная скорость разложения, %/мин, на стадии:<br>Maximal rate of decomposition, %/min, at stage:                                                                             |                                                           |      |      |       |           |
| первой / first                                                                                                                                                                     | 25,5                                                      | 67,7 | 21,7 | 63,22 | 66,6/96,8 |
| второй / second                                                                                                                                                                    | 10,41                                                     | 10,7 | 5,33 | 6,91  | 11,83/8,0 |
| Экзотермический эффект разложения, кДж/кг<br>Exothermic decomposition effect, kJ/kg                                                                                                | 2791                                                      | —    | 3184 | —     | —/3896    |
| Потеря массы при 650 °C, %<br>Loss of mass at 600 °C, %                                                                                                                            | 98,9                                                      | 98,0 | 99,0 | 97,5  | 97,0/94,7 |
| Кислородный индекс, %<br>LOI, %                                                                                                                                                    | 19,6                                                      | 19,8 | 21,1 | 23,5  | 25/25,3   |
| Примечание. Над чертой приведены данные для продуктов серии II, под чертой — серии I.<br>Note. First numbers correspond to series II products, second ones correspond to series I. |                                                           |      |      |       |           |

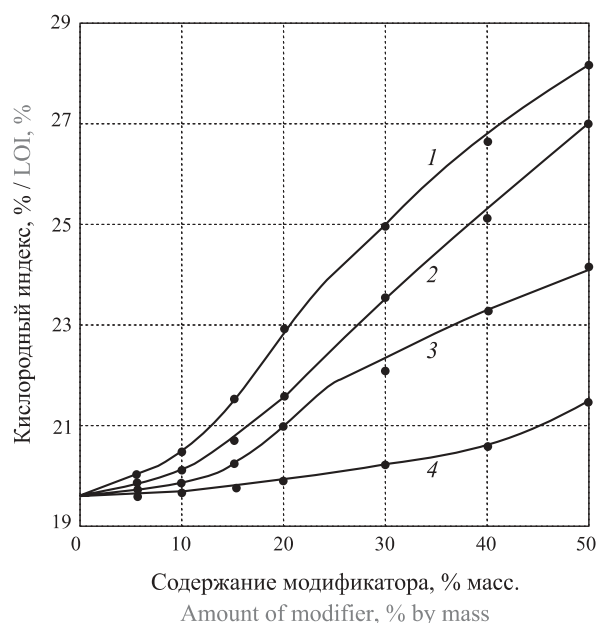
содержащих атомы брома в алифатическом или ароматическом фрагментах молекулы, и модифицированного анилином диглицидилового эфира тетрабромдиана наблюдается линейная зависимость величины  $1/KI$  от степени пропитки прокаленного асбокартона антипиреном  $K$ .  $KI$  продуктов бромирования эпоксидного олигомера ЭД-22 и модифицированного олигомера УП-631 получены экстраполяцией зависимости  $1/KI$  от величины  $K$  на нулевое содержание наполнителя по методике, приведенной в [14]. Минимальные значения  $KI$  модифицированного олигомера УП-631 реализуются при соотношении диглицидилового эфира тетрабромдиана и анилина, равном  $1:(0,4 \div 0,6)$ . При более высоком содержании анилина  $KI$  олигомера УП-631 возрастает и достигает максимальных значений при соотношении исходных компонентов, равном  $1:1$  ( $KI = 48,9 \%$ ).

Влияние содержания исследованных реакционноспособных бромсодержащих эпоксидных соединений на горючесть отвержденных связующих приведено на рис. 4. Как следует из рис. 4, хлорсодержащие эпоксидные соединения (Оксилин-6) значительно уступают по эффективности пламегасящего действия броморганическим эпоксидным соединениям. При этом бромсодержащий эпоксидный олигомер УП-631

эффективнее модифицированного анилином диглицидилового эфира тетрабромдиана при их соотношении  $1:1$  и бромированного эпоксидного олигомера ЭД-22 с концентрацией брома  $25 \%$ . Это обусловлено, по нашему мнению, различной концентрацией брома в использованных бромсодержащих эпоксидных соединениях. Этот вывод подтверждается экспериментальной зависимостью  $KI$  отвержденных эпоксидных связующих от концентрации брома (рис. 5).

Для исследованных модифицированных эпоксидных полимеров, отвержденных алифатическими аминами, наблюдается линейная зависимость величины  $KI$  от концентрации брома. Это указывает на то, что на пределе диффузионного горения химическая природа исследованных реакционноспособных антипиренов и, следовательно, расположение атомов брома в алифатическом или ароматическом фрагментах молекулы практически не влияют на горючесть эпоксидных полимеров. Эффективность определяется прежде всего концентрацией брома в антипирене.

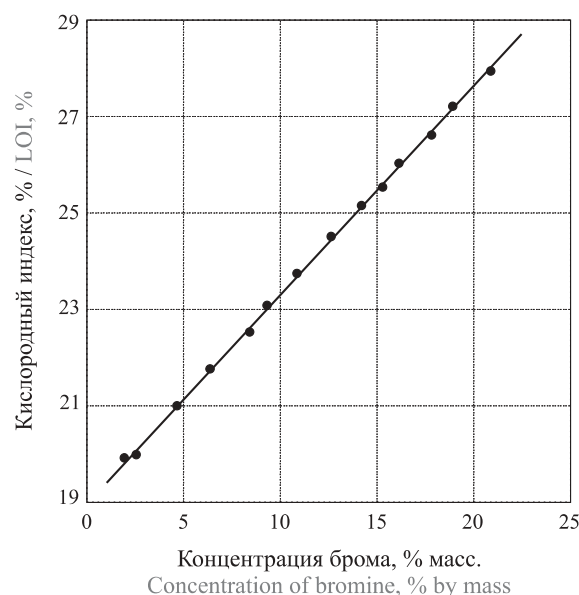
Для получения эпоксидных полимеров с  $KI$  более  $27 \%$  концентрация брома должна превышать  $18 \%$  масс. Следует отметить, что реакционноспособные бромсодержащие соединения значительно уступают по эффективности пламегасящего дейст-



**Рис. 4.** Зависимость горючести отвержденных эпоксидных связующих на основе ЭД-20 от концентрации галогенсодержащих модификаторов: 1 — бромсодержащий олигомер УП-631; 2 — модифицированный диглицидиловый эфир тетрабромдиана при мольном соотношении УП-631 и анилина, равном 1:1; 3 — бромированный олигомер ЭД-22 с концентрацией брома 25 % масс.; 4 — хлорсодержащий олигомер Оксилин-6

Fig. 4. Dependence between flammability of cured ED-20 epoxy resin and concentration of halogen-containing modifiers: 1 — bromine-containing UP-631 oligomer; 2 — modified diglycidyl ether of tetrabromodiana at 1:1 molar ratio between UP-631 and aniline; 3 — brominated ED-22 oligomer with a bromine concentration of 25 % by mass; 4 — chlorine-containing Oxylin-6 oligomer

вия аддитивным антипиренам. Так, например, для получения композитов с КИ = 27 % концентрация брома в композиции при использовании пентабромфенола составляет 8,3 %, а бромсодержащего олигомера марки УП-631 — 20 %. Это связано с более высокой концентрацией брома в аддитивных броморганических антипиренах (58,0–85,5 %) по сравнению с бромсодержащими эпоксидными соединениями (25,0–48,8 %).



**Рис. 5.** Зависимость кислородного индекса отвержденных эпоксидных связующих от концентрации брома в полимере

Fig. 5. Dependence between concentration of bromine and LOI cured epoxy binders

## Заключение

В результате экспериментальных исследований установлены количественные закономерности влияния вида и содержания аддитивных и реакционно-способных бромсодержащих антипиренов на горючесть полимерных материалов на основе эпоксидных олигомеров. Выявлена корреляция между маломасштабными методами оценки горючести полимерных материалов. Показано, что при КИ > 31 % эпоксидные материалы относятся к слабогорючим материалам. Установлено, что эффективность бромсодержащих антипиренов зависит прежде всего от концентрации брома в молекуле антипирена. Наблюдается линейная зависимость КИ материалов на основе эпоксидных бромсодержащих соединений от концентрации брома. Оптимальным содержанием аддитивных бромсодержащих антипиренов в эпоксидных материалах является 8–10 % масс. (концентрация брома составляет 6–8 %).

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. May C. A. (ed.). Epoxy resins. Chemistry and technology. — 2<sup>nd</sup> ed. — New York : Marcel Dekker, 1988. — 1247 p.
2. Hollaway L. (ed.). Handbook of polymer composites for engineers. — Cambridge : Woodhead Publishing Ltd., 1994. — 338 p. DOI: 10.1533/9781845698607.
3. Hollaway L. (ed.). Polymer composites for civil and structural engineering. — Dordrecht : Springer, 1993. — 268 p. DOI: 10.1007/978-94-011-2136-1.
4. Степанова В. Ф., Степанов А. Ю., Жирков Е. П. Арматура композитная полимерная. — М. : Бумажник, 2013. — 200 с.
5. Шилин А. А., Пищеничный В. А., Картузов Д. В. Внешнее армирование железобетонных конструкций композиционными материалами. — М. : Стройиздат, 2007. — 184 с.

6. Horrocks A. R., Price D. (eds.). Advances in fire retardant materials. — Cambridge : Woodhead Publishing Ltd., 2008. — 616 p. DOI: 10.1533/9781845694701.
7. Ratna D. Epoxy composites: Impact resistance and flame retardancy. — Shawbury : Smithers Rapra Technology, 2005. — 128 p.
8. Михайлин Ю. А. Тепло-, термо- и огнестойкость полимерных материалов. — СПб. : Научные основы и технологии, 2011. — 416 с.
9. Ушков В. А., Абрамов В. В., Лалаян В. М., Кирьянова Л. М. Слабогорючие эпоксидные полимер-растворы, используемые для восстановления и ремонта строительных конструкций // Пожаровзрывобезопасность. — 2012. — Т. 21, № 10. — С. 36–40.
10. Халтуринский Н. А. О механизме действия галогенсодержащих ингибиторов // Все материалы. Энциклопедический справочник. — 2009. — № 11. — С. 22–30.
11. Халтуринский Н. А. О механизме действия галогенсодержащих ингибиторов // Все материалы. Энциклопедический справочник. — 2009. — № 12. — С. 30–37.
12. Халтуринский Н. А., Рудакова Т. А. Физические аспекты горения полимеров и механизм действия ингибиторов // Химическая физика. — 2008. — Т. 27, № 6. — С. 73–84.
13. Ушков В. А., Лалаян В. М., Ломакин С. М., Невзоров Д. И. О влиянии неразлагающихся наполнителей на воспламеняемость и дымообразующую способность полимерных композиционных материалов // Пожаровзрывобезопасность. — 2013. — Т. 22, № 6. — С. 32–39.
14. Ушков В. А., Лалаян В. М., Невзоров Д. И., Ломакин С. М. О влиянии фталатных и фосфатных пластификаторов на воспламеняемость и дымообразующую способность полимерных композиционных материалов // Пожаровзрывобезопасность. — 2013. — Т. 22, № 10. — С. 25–33.

Материал поступил в редакцию 16 июня 2017 г.

**Для цитирования:** Ушков В. А., Копытин А. В., Селезнев В. А., Смирнов В. А. Эффективность броморганических антипиренов в эпоксидных композиционных материалах // Пожаровзрывобезопасность / Fire and Explosion Safety. — 2017. — Т. 26, № 7. — С. 5–15. DOI: 10.18322/PVB.2017.26.07.5-15.

English

## EFFICIENCY OF BROMINATED FIRE RETARDANTS IN EPOXY COMPOSITES MATERIALS

**USHKOV V. A.**, Candidate of Technical Sciences, Head of Modern Composites for Construction Laboratory, National Research Moscow State University of Civil Engineering (Yaroslavskoye Shosse, 26, Moscow, 129337, Russian Federation; e-mail: va.ushkov@yandex.ru)

**KOPYTIN A. V.**, Postgraduate Student of Technology of Binders and Concretes Department, National Research Moscow State University of Civil Engineering (Yaroslavskoye Shosse, 26, Moscow, 129337, Russian Federation; e-mail: a.kopytin@ktbbeton.com)

**SELEZNEV V. A.**, Postgraduate Student of Technology of Binders and Concretes Department, National Research Moscow State University of Civil Engineering (Yaroslavskoye Shosse, 26, Moscow, 129337, Russian Federation; e-mail: va.ushkov@yandex.ru)

**SMIRNOV V. A.**, Candidate of Technical Sciences, Associate Professor, Lead Researcher of Nanomaterials and Nanotechnology Research and Educational Centre, National Research Moscow State University of Civil Engineering (Yaroslavskoye Shosse, 26, Moscow, 129337, Russian Federation; e-mail: smirnov@nocnt.ru)

### ABSTRACT

**Introduction.** Composites based on epoxy oligomers are characterized by complex of beneficial operational properties. However, wide use of such composites in modern construction industry is limited by their relatively low fire safety. It is known that properties related to fire safety can effectively be controlled by brominated fire retardants. At the same time, quantitative dependencies

between amount, chemical type of retardant and properties related to fire safety of epoxy polymers till now are not revealed in detail.

**Purpose of the work.** The purpose of this work is to study the dependencies between combustibility, fume evolution of epoxy-based polymers and amount and chemical type of industrial additive and reactive brominated fire retardants.

**Materials and methods.** Epoxy polymers were prepared on the base of ED-20 epoxy resin. Several additive and reactive flame retardants are used: hexabromobenzene, decabromo-diphenyloxide, 2,4,6-tribromanyline, 3,5,3',5'-tetrabromo-4,4'-diamino-diphenylsulfone, N(2,4,6-tribromophenyl)-maleimide, 2,4,6-tribromophenol, tetrabromo-diphenylolpropane, pentabromophenol, pentabromophenol glycidyl ether, tetrabromo-phthalic anhydride, chlorohydrin pentabromophenol ether, microencapsulated chladone 114B2, CCl<sub>4</sub>, ammonium polyphosphate, decabromodiphenyloxide, reactive halogen-containing epoxy oligomers OXYLIN-6 and UP-631 and brominated epoxy oligomer ED-22. DuPont-9900 device is used for thermal analysis. Properties related to fire safety are determined in accordance with RU GOST 12.1.044–89 and several methods that were previously developed by authors of this work.

**Results.** It is shown that there is only a weak dependence between chemical structure of the brominated fire retardants and combustibility of epoxy polymer. The primary factor that determines fire safety is the total amount of bromine. Another important factor that controls efficiency of brominated fire retardant is the proximity between temperatures of start of intensive decomposition for polymer and brominated compound. As gas phase fire retardants, brominated compounds inhibit the radical chains of flame processes and phlegmatize the flame by decomposition products. The flammability and combustibility of epoxy polymers decreases together with the increase in the content of additive brominated fire retardants: the oxygen index can be increased by about 50 %, the ignition temperature decreases by about 5 %. The effectiveness of microencapsulated fire retardants that allow to actively suppress the ignition source and to eliminate fire at the initial stage, significantly depends on the diameter of the microspheres and the chemical nature of the fire retardant used; in general, the effectiveness of microencapsulated fire retardants is slightly lower than the effectiveness of their active compound. The use of reactive compounds prevents the migration of the fire retardant; for such fire retardants, a linear dependence between oxygen index and bromine concentration was observed.

**Conclusion.** In the present work we have summarized results of several laboratory tests that allow to reveal the influence of content and chemical nature of brominated fire retardants to the fire hazard indicators of epoxy polymers. A correlation was found between the oxygen index and the combustibility index. It is shown that to obtain low-combustible materials the oxygen index should exceed 31 %. It has been established that the chemical structure of additive aromatic brominated fire retardants has practically no effect on flammability. It was found that the optimal concentration of industrial brominated fire retardants is 8–10 % by weight.

**Keywords:** brominated flame retardant; combustibility; limiting oxygen index; fume evolution index; thermal stability.

## REFERENCES

1. May C. A. (ed.). *Epoxy resins. Chemistry and technology*. 2<sup>nd</sup> ed. New York, Marcel Dekker, 1988. 1247 p.
2. Hollaway L. (ed.). *Handbook of polymer composites for engineers*. Cambridge, Woodhead Publishing Ltd., 1994. 338 p. DOI: 10.1533/9781845698607.
3. Hollaway L. (ed.). *Polymer composites for civil and structural engineering*. Dordrecht, Springer, 1993. 268 p. DOI: 10.1007/978-94-011-2136-1.
4. Stepanova V. F., Stepanov A. Yu., Zhirkov E. P. *Armatura kompozitnaya polimernaya* [Polymer matrix composite reinforcement]. Moscow, Bumazhnik Publ., 2013. 200 p. (in Russian).
5. Shilin A. A., Pshenichnyy V. A., Kartuzov D. V. *Vneshneye armirovaniye zhelezobetonnykh konstruktsey kompozitsionnymi materialami* [External reinforcement of ferroconcrete by composite materials]. Moscow, Stroyizdat Publ., 2007. 184 p. (in Russian).
6. Horrocks A. R., Price D. (eds.). *Advances in fire retardant materials*. Cambridge, Woodhead Publishing Ltd., 2008. 616 p. DOI: 10.1533/9781845694701.
7. Ratna D. *Epoxy composites: Impact resistance and flame retardancy*. Shawbury, Smithers Rapra Technology, 2005. 118 p.

8. Mikhaylin Yu. A. *Teplo-, termo- i ognestoykost polimernykh materialov* [Thermal stability and fire resistance of polymers]. Saint Petersburg, Nauchnyye osnovy i tekhnologii Publ. [Scientific Foundations and Technologies], 2011. 416 p. (in Russian).
9. Ushkov V. A., Abramov V. V., Lalyan V. M., Kiryanova L. V. Hard combustible epoxy polymer solutions in restoration and repair of building constructions. *Pozharovzryvbezopasnost / Fire and Explosion Safety*, 2012, vol. 21, no. 10, pp. 36–40 (in Russian).
10. Khalturinskiy N. A. Processes that causes the destruction of halide retardants. *Vse materialy. Entsiklopedicheskiy spravochnik / All Materials. Encyclopedic Reference Book*, 2009, no. 11, pp. 22–30 (in Russian).
11. Khalturinskiy N. A. Processes that causes the destruction of halide retardants. *Vse materialy. Entsiklopedicheskiy spravochnik / All Materials. Encyclopedic Reference Book*, 2009, no. 12, pp. 30–37 (in Russian).
12. Khalturinskii N. A., Rudakova T. A. Physical aspects of polymer combustion and the inhibition mechanism. *Russian Journal of Physical Chemistry B*, 2008, vol. 2, issue 3, pp. 480–490. DOI: 10.1134/s1990793108030238.
13. Ushkov V. A., Lalyan V. M., Lomakin S. M., Nevzorov D. I. About influence of non-degradable fillers for flammability and smoke-forming ability of polymer composite materials. *Pozharovzryvbezopasnost / Fire and Explosion Safety*, 2013, vol. 22, no. 6, pp. 32–39 (in Russian).
14. Ushkov V. A., Lalyan V. M., Nevzorov D. I., Lomakin S. M. The effect of phthalate and phosphorus plasticizer for flammability and smoke-forming ability of polymer composite materials. *Pozharovzryvbezopasnost / Fire and Explosion Safety*, 2013, vol. 22, no. 10, pp. 25–33 (in Russian).

**For citation:** Ushkov V. A., Kopytin A. V., Seleznev V. A., Smirnov V. A. Efficiency of brominated fire retardants in epoxy composites materials. *Pozharovzryvbezopasnost / Fire and Explosion Safety*, 2017, vol. 26, no. 7, pp. 5–15 (in Russian). DOI: 10.18322/PVB.2017.26.07.5-15.



## Издательство «ПОЖНАУКА»

Представляет книгу



### Д. Г. Пронин, Д. А. Корольченко ДЕЛЕНИЕ ЗДАНИЙ НА ПОЖАРНЫЕ ОТСЕКИ : учебное пособие.

— М. : Издательство "ПОЖНАУКА", 2014. — 40 с. : ил.

В учебном пособии изложены базовые основы, действующие требования и современные представления о целях, задачах и способах ограничения распространения пожара по зданиям и сооружениям путем их разделения на пожарные отсеки.

Пособие предназначено для студентов Московского государственного строительного университета. Оно может быть использовано также другими образовательными учреждениями и практическими работниками, занимающимися вопросами обеспечения пожарной безопасности.

121352, г. Москва, а/я 43; тел./факс: (495) 228-09-03; e-mail: info@fire-smi.ru

**А. В. ИВАНОВ**, канд. техн. наук, доцент кафедры пожарной безопасности технологических процессов и производств, Санкт-Петербургский университет ГПС МЧС России (Россия, 196105, г. Санкт-Петербург, Московский просп., 149; e-mail: spark002@mail.ru)

**А. Ю. СОРОКИН**, адъюнкт кафедры пожарной безопасности технологических процессов и производств, Санкт-Петербургский университет ГПС МЧС России (Россия, 196105, г. Санкт-Петербург, Московский просп., 149; e-mail: aleksey.sorokin.1987@list.ru)

**Г. К. ИВАХНЮК**, д-р хим. наук, профессор, профессор кафедры инженерной защиты окружающей среды, Санкт-Петербургский государственный технологический институт (Технический университет) (Россия, 190013, г. Санкт-Петербург, Московский просп., 26; e-mail: fireside@inbox.ru)

**Ф. В. ДЕМЕХИН**, д-р техн. наук, профессор кафедры пожарной безопасности технологических процессов и производств, Санкт-Петербургский университет ГПС МЧС России (Россия, 196105, г. Санкт-Петербург, Московский просп., 149; e-mail: demehin@yandex.ru)

УДК 614.841.4:62

## УПРАВЛЕНИЕ ЭЛЕКТРОСТАТИЧЕСКИМИ СВОЙСТВАМИ ЖИДКИХ УГЛЕВОДОРОДОВ, МОДИФИЦИРОВАННЫХ УГЛЕРОДНЫМИ НАНОСТРУКТУРАМИ

Представлены результаты исследований электрофизических свойств жидких углеводородов в условиях модификации углеродными наноструктурами, а также воздействия переменного частотно-модулированного потенциала (ПЧМП). Функционализация углеродных наноструктур с многослойными углеродными нанотрубками (MWCNT) проводилась с помощью реагентной модификации. Методом рамановской спектроскопии установлено изменение структуры углеродных наноматериалов после их функционализации. Получены данные об изменении коэффициента поверхностного натяжения, скорости истечения, времени испарения углеводородных жидкостей в условиях депонирования функционализированных MWCNT и воздействия ПЧМП. Установлено, что наножидкости с MWCNT имеют более высокие значения коэффициента поверхностного натяжения и времени каплепадения, а интенсивность испарения снижается. Показано, что в условиях электрофизического воздействия наблюдается дополнительное уменьшение коэффициента поверхностного натяжения, а также незначительное увеличение скорости истечения и уменьшение интенсивности испарения наножидкостей, что позволяет снизить вероятность возникновения взрывоопасных концентраций при аварийных ситуациях в технологических аппаратах с ЛВЖ и ГЖ. Проведены исследования процессов электризации жидкостей в условиях ультразвуковой гомогенизации. Сделан вывод о том, что процесс гомогенизации наножидкостей на основе жидких углеводородов характеризуется более низкой скоростью роста напряженности электрического поля, что способствует снижению вероятности образования искровых разрядов статического электричества.

**Ключевые слова:** наножидкость; статическое электричество; электростатическая искробезопасность; углеводородные жидкости; многослойные углеродные нанотрубки; переменный частотно-модулированный потенциал.

**DOI:** 10.18322/PVB.2017.26.07.16-27

### Введение

Одним из основных направлений обеспечения пожарной безопасности технологических процессов, связанных с обращением углеводородных жидкостей, является соблюдение условий взрывозащиты в условиях опасных проявлений статического электричества (СЭ), связанных с электризацией жидкостей.

Электризация жидкостей происходит при различных процессах и операциях (распыление, перемешивание, гомогенизация, барботирование, транс-

портировка и др.). Значительная пожарная опасность может возникать при обращении с непроводящими углеводородными жидкостями. При этом необходимо соблюдать требования электростатической искробезопасности (ЭСИБ) и учитывать возможные проявления СЭ в условиях нормальной аварийной работы технологического оборудования [1].

Существующие методы обеспечения взрывопожарной и пожарной безопасности в условиях возможной электризации направлены на предупреждение образования смесей паров жидкости и окислителя

в пределах воспламенения, а также нейтрализацию зарядов СЭ. Нейтрализация СЭ проводится с помощью заземлителей и нейтрализаторов, конструктивных методов, технических и технологических решений, препятствующих образованию зарядов [2].

Одним из способов предотвращения накопления зарядов СЭ является применение антистатических присадок (соединений хрома, меди, кобальта и др.), обеспечивающих утечку заряда на заземленные части оборудования за счет увеличения объемной проводимости среды. Рабочие концентрации данных присадок составляют тысячные доли процента, тем не менее даже такое их количество позволяет изменять электропроводность жидкостей на порядки. Вместе с тем существующие антистатические присадки не лишены существенных недостатков, накладывающих ограничения на область их применения. В частности, при хранении и транспортировке углеводородных жидкостей присадки сорбируются металлическими поверхностями емкостей и трубопроводов и теряют свою эффективность [2, 3]. Таким образом, задача разработки антистатических присадок для управления процессами испарения и электризации углеводородных жидкостей при их транспортировке является весьма актуальной.

Взрывы паровоздушных смесей жидких углеводородов при разрядах СЭ возможны при наличии над зеркалом жидкости паров взрывоопасной концентрации и достаточной энергии электрического разряда.

Количество испарившейся жидкости  $m_{\text{исп}}$  определяется по формуле

$$m_{\text{исп}} = W \tau_{\text{исп}} S_{\text{исп}}, \quad (1)$$

где  $W$  — интенсивность испарения нефтепродукта, кг/(м<sup>2</sup>·с);

$\tau_{\text{исп}}$  — время испарения, с;

$S_{\text{исп}}$  — площадь испарения, м<sup>2</sup>.

Согласно ГОСТ 31613–2012 для обеспечения ЭСИБ необходимо соблюдение условий, при которых энергия разряда или заряда СЭ с изделия или материала не превышает критических значений для соответствующих паровых смесей. Критериями ЭСИБ безыскровой электризации с высокой надежностью отвечают жидкости в заземленном металлическом оборудовании с удельным объемным электрическим сопротивлением  $\rho_V$  (Ом·м) [4, 5] не более значений, определяемых соотношением [1]:

$$\rho_V = 2\phi/(jL), \quad (2)$$

где  $\phi$  — потенциал в центре наэлектризованной жидкости, В;

$j$  — предельно возможная плотность тока электризации в воздухе, 10<sup>–4</sup> А/м<sup>2</sup>;

$L$  — радиус зеркала жидкости, м.

Время релаксации заряда СЭ в нефтепродукте  $\tau$  (с) может быть определено по формуле

$$\tau = \varepsilon \varepsilon_0 \rho_V, \quad (3)$$

где  $\varepsilon$  — относительная диэлектрическая проницаемость нефтепродукта;

$\varepsilon_0$  — электрическая постоянная, Ф/м;

$\varepsilon_0 = 8,854 \cdot 10^{-12}$  Ф/м.

При использовании антистатических присадок при определенной концентрации примесей в нефтепродукте возможна его наибольшая электризация. Так, экспериментально установлено, что наибольшая электризация нефтепродуктов наблюдается при удельном электрическом сопротивлении порядка 10<sup>11</sup> Ом·м [4] (рис. 1).

Таким образом, использование антистатических присадок для повышения поверхностного натяжения и электропроводности легко воспламеняющихся (ЛВЖ) и горючих (ГЖ) жидкостей может обеспечить требуемое время релаксации заряда из объема углеводородных жидкостей, что в сочетании с минимизацией интенсивности испарения даст возможность снизить вероятность взрывов паровоздушных смесей от разрядов СЭ.

Применение углеродных наноструктур, в том числе графена и многослойных углеродных нанотрубок (MWCNT), позволяет изменять свойства различных жидкостей. Экспериментально установлено, что свойства модифицированных наноматериалов во многом зависят от концентрации наноструктур, а также от соотношения длин и диаметров нановолокон [6]. Сводные данные, полученные при исследованиях некоторых органических жидкостей, модифицированных углеродными наночастицами, приведены в табл. 1.

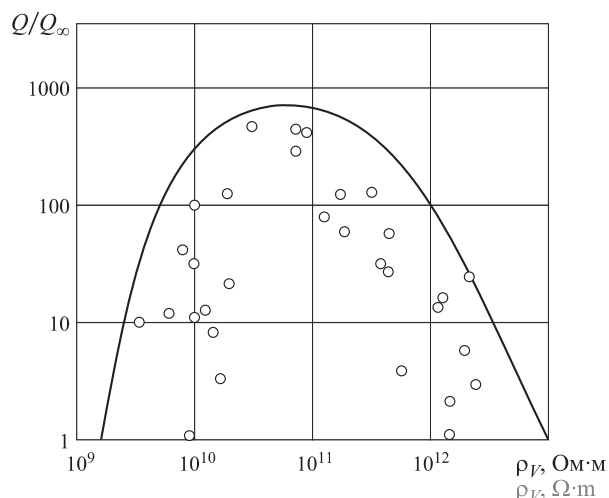


Рис. 1. Зависимость электризации нефтепродуктов  $Q/Q_\infty$  от удельного сопротивления жидкости  $\rho_V$  [4]

Fig. 1. Dependence of the electrization of petroleum products  $Q/Q_\infty$  on the specific resistance of the liquid  $\rho_V$  [4]

**Таблица 1.** Свойства органических жидкостей и твердых полимеров, модифицированных углеродными наночастицами  
**Table 1.** Properties of organic liquids and solid polymers modified with carbon nanoparticles

| Базовая жидкость<br>Base fluid                                                                                      | Характеристика наночастиц<br>Characterization of nanoparticles                                                                                                                                         | Свойства наножидкости<br>в сравнении с базовой<br>The properties of the nanofluid<br>in comparison with the base                                                                                              | Источник<br>References |
|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|------------------------|
| Этиленгликоль<br>Ethylene glycol                                                                                    | Графен (0,056 % об.) ( $r = 0,7...3,0$ мкм), диспергирование ультразвуком при $T = 25...50$ °C<br>Graphene (0.056 % vol.) ( $r = 0.7...3.0$ μm), ultrasonic dispersion at $T = 25...50$ °C             | Повышение электропроводности в 3...6 раз<br>Increase in electrical conductivity in 3...6 times                                                                                                                | [7]                    |
| Этиленгликоль 70 % об. + дистиллированная вода 30 % об.<br>Ethylene glycol 70 % by vol. + Distilled water 30 % vol. | Графен (0,041...0,395 % об.), диспергирование ультразвуком при $T = 30$ °C<br>Graphene (0.041...0.395 % vol.), ultrasonic dispersion at $T = 30$ °C                                                    | Уменьшение вязкости на 100 %, повышение электропроводности на 8620 %<br>The decrease in viscosity by 100 %, the increase in electrical conductivity by 8620 %                                                 | [8]                    |
| Этанол<br>Ethanol                                                                                                   | MWCNT (0,5...3,0 % об.) ( $d = 10...30$ нм), диспергирование ультразвуком<br>MWCNT (0.5...3.0 % vol.) ( $d = 10...30$ nm), ultrasonic dispersion                                                       | Повышение электропроводности в 2...15 раз<br>Increase of electrical conductivity in 2...15 times                                                                                                              | [9]                    |
| Этанол<br>Ethanol                                                                                                   | MWCNT (0,5...3,0 % об.) ( $d = 30$ нм, $l = 2...5$ мкм), диспергирование ультразвуком при $T = 20$ °C<br>MWCNT (0.5...3.0 % vol.) ( $d = 30$ nm, $l = 2...5$ μm), ultrasonic dispersion at $T = 20$ °C | Повышение электропроводности в 2...3 раза, снижение давления насыщенного пара на 20...50 %<br>The increase in electrical conductivity is 2...3 times, the pressure of saturated steam is reduced by 20...50 % | [10]                   |

Целью настоящего исследования было обоснование применения углеродных наноструктур для обеспечения ЭСИБ при обращении с жидкими углеводородами. В работе приведены результаты исследования структуры наноматериалов, коэффициента поверхностного натяжения, кинетики испарения углеводородных жидкостей, модифицированных углеродными наноконпонентами, а также процессов их электризации в условиях ультразвуковой гомогенизации.

### Материалы и методы исследований

В качестве объектов исследования были выбраны углеродные наноматериалы, содержащие

MWCNT, которые были получены методом каталитического пиролиза на установке “CVDomna” [11]. Наноматериалы подвергались реагентной модификации для улучшения их эксплуатационных характеристик [12].

Имеющиеся MWCNT функционализировались в смеси 25 %-ной азотной кислоты ( $\text{HNO}_3$ ) и 75 %-ной серной кислоты ( $\text{H}_2\text{SO}_4$ ). Для этого в 1 л смеси с температурой 100 °C добавлялась по 0,25 г MWCNT на 1 ч. Часть MWCNT выпадала в осадок, другая отделялась от взвеси с помощью центрифугирования и высушивалась при температуре 85...90 °C. Осадок и взвесь MWCNT промывались дистиллированной водой до достижения pH = 6,5. Далее проводилась сушка остатка при температуре 60 °C. Сводные дан-

**Таблица 2.** Порядок подготовки исследуемых наноматериалов  
**Table 2.** The order of preparation of the investigated nanomaterials

| Образец<br>Material       | Технологическая операция / Technological operation       |                                                        |                                                     |                                                               |
|---------------------------|----------------------------------------------------------|--------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------|---------------------------------------------------------------|
|                           | Обработка смесью кислот<br>Treatment by mixture of acids | Сбор выпавшего осадка<br>Collection of the precipitate | Центрифугирование взвеси<br>Centrifuging the slurry | Промывка дистиллированной водой<br>Rinsing by distilled water |
| MWCNT (H)np / MWCNT (N)nr | +                                                        | +                                                      | –                                                   | +                                                             |
| MWCNT (H)np / MWCNT (N)pr | +                                                        | –                                                      | +                                                   | +                                                             |
| MWCNT (O)np / MWCNT (O)nr | +                                                        | +                                                      | –                                                   | +                                                             |
| MWCNT (O)np / MWCNT (O)pr | +                                                        | –                                                      | +                                                   | +                                                             |

**Таблица 3.** Свойства исследуемых жидкостей

**Table 3.** Properties of the tested liquids

| Свойство<br>Property                                                          | Бензин<br>НЕФРАС<br>C2-80/120<br>Petrol<br>NEFRAS<br>C2-80/120 | Керосин<br>ТС-1<br>Kerosene<br>TS-1 |
|-------------------------------------------------------------------------------|----------------------------------------------------------------|-------------------------------------|
| Молярная масса, кг/кмоль<br>Molar mass, kg/kmol                               | ~114                                                           | ~156                                |
| Температура вспышки, °C<br>Flash temperature, °C                              | -17                                                            | ≥28                                 |
| Плотность при 20 °C, кг/м <sup>3</sup><br>Density at 20 °C, kg/m <sup>3</sup> | 720                                                            | ≥781                                |
| Поверхностное натяжение<br>при 25 °C, Н/м<br>Surface tension at 25 °C, N/m    | ~0,021                                                         | ~0,024                              |

ные о характере подготовки наноматериалов представлены в табл. 2.

В качестве базовых жидкостей использовались бензин НЕФРАС C2-80/120 [13, 14], керосин ТС-1 (ГОСТ 10227–86, [15]). Сводные данные о свойствах жидкостей приведены в табл. 3.

Наножи́дкости получены путем диспергирования наноматериалов с MWCNT в базовой жидкости (с концентрацией 0,2 % масс.) при воздействии источника ультразвука с частотой 100 кГц в течение 1 ч при температуре 40 °C. Для образцов MWCNT, полученных при центрифугировании исходного на-

номатериала, наблюдался более однородный состав наножи́дкостей в сравнении с образцами, полученными из нерастворенного осадка (рис. 2 и 3).

В ходе экспериментов отдельные образцы наноматериалов подвергались электрофизическому воздействию [16] с параметрами переменного частотно-модулированного потенциала (ПЧМП) 112 В, 50 Гц.

Оценка изменения характеристических пиков углеродного наноматериала с MWCNT при их функционализации выполнялась методом рамановской спектроскопии на установке “Ntegra Spectra” с длиной волны лазера 532 нм.

Измерение коэффициента поверхностного натяжения модифицированных углеводородных жидкостей (бензин НЕФРАС C2-80/120, керосин ТС-1) проводилось методом отрыва капель. Время каплепадения фиксировалось секундомером [17].

Коэффициент поверхностного натяжения  $\sigma$  определялся по формуле

$$\sigma = \rho g V / (n \pi d), \quad (5)$$

где  $\rho$  — плотность жидкости, кг/м<sup>3</sup>;

$g$  — ускорение свободного падения, м/с<sup>2</sup>;

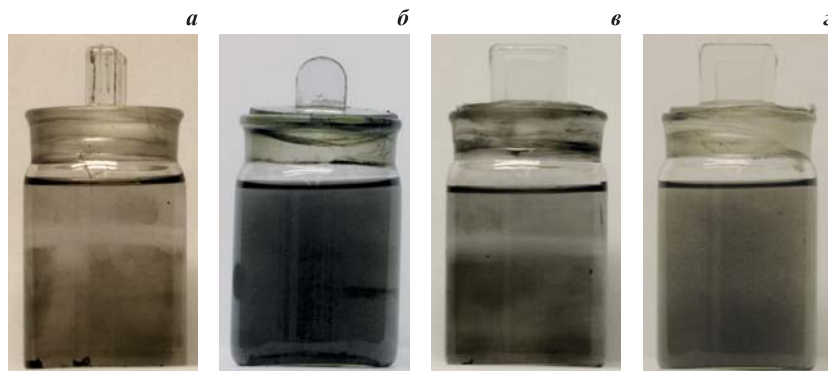
$g = 9,81$  м/с<sup>2</sup>;

$V$  — объем жидкости, мл;  $V = 1$  мл;

$n$  — количество капель;

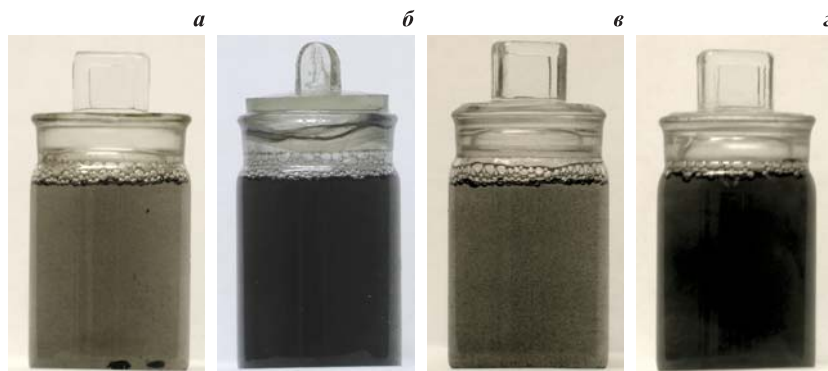
$d$  — диаметр шейки, мм;  $d = 0,6$  мм.

Исследование времени испарения жидкостей происходило в вытяжном шкафу размером 1,5×1,2×2,5 м при температуре воздуха 25 °C и кратности воз-



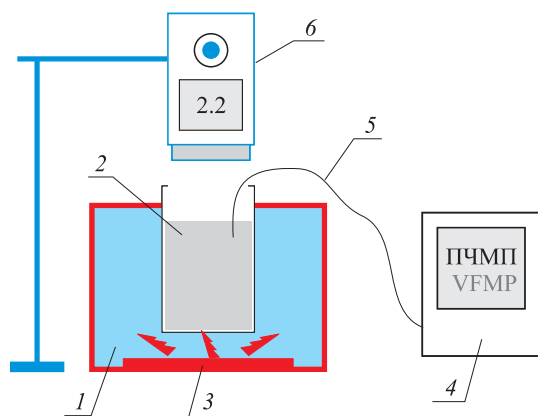
**Рис. 2.** Наножи́дкости на основе бензина НЕФРАС C2-80/120 с концентрацией наноматериала 0,2 % масс.: *a* — MWCNT (Н)nr; *б* — MWCNT (Н)nr; *в* — MWCNT (О)nr; *г* — MWCNT (О)nr

Fig. 2. Nanofluids based on petrol NEFRAS C2-80/120 with nanomaterial concentration of 0.2 wt. %: *a* — MWCNT (N)nr; *b* — MWCNT (N)nr; *v* — MWCNT (O)nr; *g* — MWCNT (O)nr



**Рис. 3.** Наножи́дкости на основе керосина ТС-1 с концентрацией наноматериала 0,2 % масс.: *a* — MWCNT (Н)nr; *б* — MWCNT (Н)nr; *в* — MWCNT (О)nr; *г* — MWCNT (О)nr

Fig. 3. Nanofluids based on kerosene TS-1 with nanomaterial concentration of 0.2 wt. %: *a* — MWCNT (N)nr; *b* — MWCNT (N)nr; *v* — MWCNT (O)nr; *g* — MWCNT (O)nr



**Рис. 4.** Схема лабораторной установки для исследования процессов электризации при гомогенизации наножидкостей: 1 — емкость с водой; 2 — емкость с наножидкостью; 3 — источник ультразвука; 4 — генератор ПЧМП; 5 — волновод; 6 — электростатический вольтметр SF 156

Fig. 4. Scheme of a laboratory installation for studying the electrization processes during the homogenization of nanofluids: 1 — capacity with water; 2 — capacity with nanofluid; 3 — the source of ultrasound; 4 — VFMP generator; 5 — waveguide; 6 — electrostatic voltmeter SF 156

духообмена  $6 \text{ ч}^{-1}$ . Предварительно подготовленные наножидкости помещали в емкости с открытой поверхностью диаметром 60 мм и высотой 72 мм. Потери массы фиксировали на лабораторных

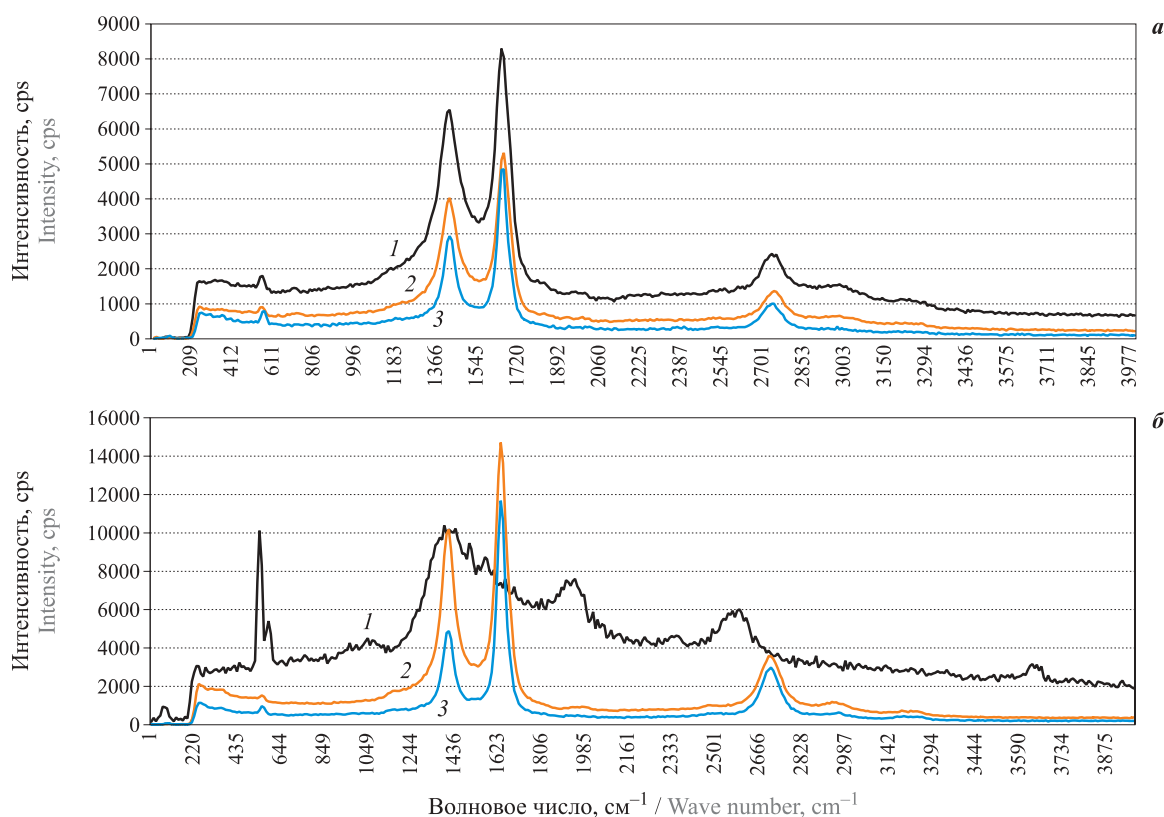
весах марки ВЛТЭ-5000 в течение 3 ч для бензина НЕФРАС С2-80/120 и 7 сут — для керосина ТС-1.

Исследование процессов электризации наножидкостей проводили в установке ультразвуковой гомогенизации (рис. 4). Наножидкости помещали в стеклянные емкости вместимостью 50 мл, после чего их перемешивали при воздействии ультразвука (частота 100 кГц, мощность 1 кВт) в течение 5 мин при температуре  $25...40^\circ\text{C}$ . Напряженность электрического поля измеряли электростатическим вольтметром SF 156 на расстоянии 50 мм от поверхности жидкости.

## Результаты и их обсуждение

### Исследование структуры наноматериалов методом рамановской спектроскопии

Углеродный наноматериал MWCNT (O) изначально содержал достаточно большое количество структурированного углеродного материала и имел хорошо выраженную G-полосу в области  $1600 \text{ см}^{-1}$ . D-полоса в области  $1400 \text{ см}^{-1}$  также была значительно выражена, что может свидетельствовать о наличии в образце аморфного углерода (рис. 5, а). Наноматериал MWCNT (H) не имел хорошо выраженной G-полосы, в то время как D-полоса, характеризующая наличие аморфного углерода, была вы-



**Рис. 5.** Рамановский спектр наноматериалов MWCNT (O) (а) и MWCNT (H) (б) при их функционализации: 1 — исходный материал; 2 — MWCNT в нерастворимом осадке; 3 — MWCNT во взвеси

Fig. 5. Raman spectrum of nanomaterials MWCNT (O) (a) and MWCNT (N) (b) at its functionalization: 1 — initial material; 2 — MWCNT in an insoluble precipitate; 3 — MWCNT in suspension

ражена отчетливо (рис. 5,б), что может говорить о низком качестве исходного наноматериала.

После функционализации рамановские спектры наноматериалов MWCNT (O) и MWCNT (H) характеризовались интенсивной G-полосой. Интенсивность D-полосы, характеризующая дефектность MWCNT в наноматериале, оказалась выше для образцов, полученных при центрифугировании взвеси функционализированных нанотрубок MWCNT (O) в сравнении с образцами MWCNT (H).

### Измерение поверхностного натяжения и времени истечения наножидкостей

Измерения показали, что наножидкости на основе бензина НЕФРАС С2-80/120 имеют более высокие по сравнению с исходными образцами значения коэффициента поверхностного натяжения (на 6...25 %) и времени каплепадения (на 10...18 %). В условиях электрофизического воздействия наблюдается преимущественное снижение коэффициента поверхностного натяжения наножидкостей на 3...5 %, а также увеличение времени истечения на 12...15 % (рис. 6).

Для наножидкостей на основе керосина ТС-1 коэффициент поверхностного натяжения изменился незначительно (до 6 %). Для времени истечения наблюдалось увеличение значений на 10...24 %.

В условиях электрофизического воздействия наблюдается незначительное уменьшение коэффициента поверхностного натяжения на 4...6 %, а также повышение скорости истечения на 3...5 % (рис. 7), что связано с воздействием ПЧМП на реологические параметры базовой жидкости [18].

### Исследование времени испарения модифицированных наножидкостей с открытой поверхности

По результатам измерений можно сделать вывод, что внедрение MWCNT в базовую жидкость позволяет снизить интенсивность испарения в среднем на 30 % для бензина НЕФРАС С2-80/120 (рис. 8,а). Для керосина ТС-1 с наноматериалом MWCNT (O) наблюдалось снижение интенсивности испарения на 38 %, а для MWCNT (H) интенсивность испарения наножидкости осталась практически на прежнем уровне, что может быть объяснено сорбционными свойствами веществ и требует дополнительных исследований (рис. 9,а).

При электрофизическом воздействии интенсивность испарения наножидкостей на основе бензина НЕФРАС С2-80/120 приближается к значениям, соответствующим базовой жидкости (рис. 8,б). Для керосина ТС-1 при электрофизическом воздействии происходит значительное снижение (в 3,1 раза) интенсивности испарения (рис. 9,б).

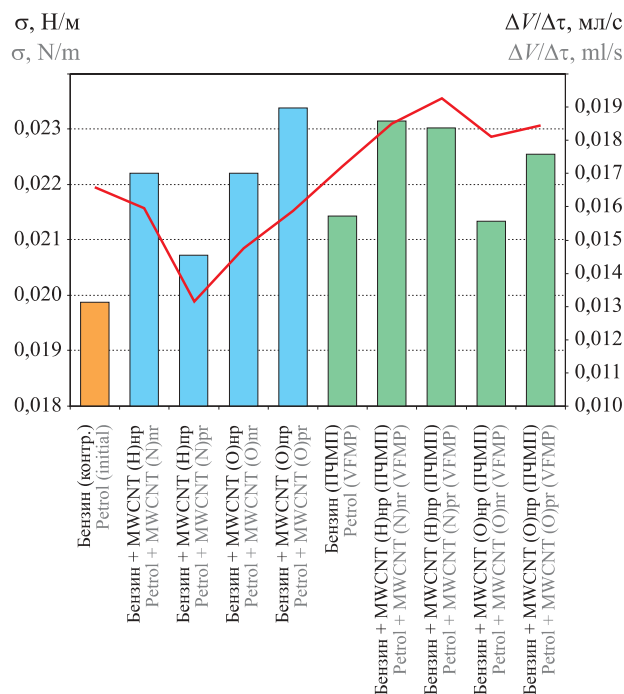


Рис. 6. Коэффициент поверхностного натяжения  $\sigma$  (□) и время истечения наножидкостей  $\Delta V/\Delta\tau$  (—) на основе бензина НЕФРАС С2-80/120 без воздействия ПЧМП (■) и при его воздействии (■)

Fig. 6. Coefficient of surface tension  $\sigma$  (□) and the expiration time of nanofluids  $\Delta V/\Delta\tau$  (—) based on petrol NEFRAS C2-80/120 without affecting VFMP (■) and with affecting VFMP (■)

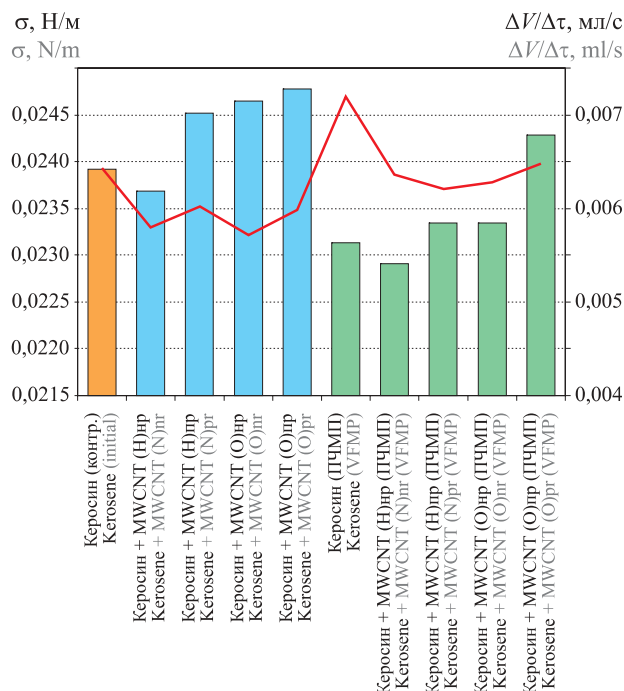
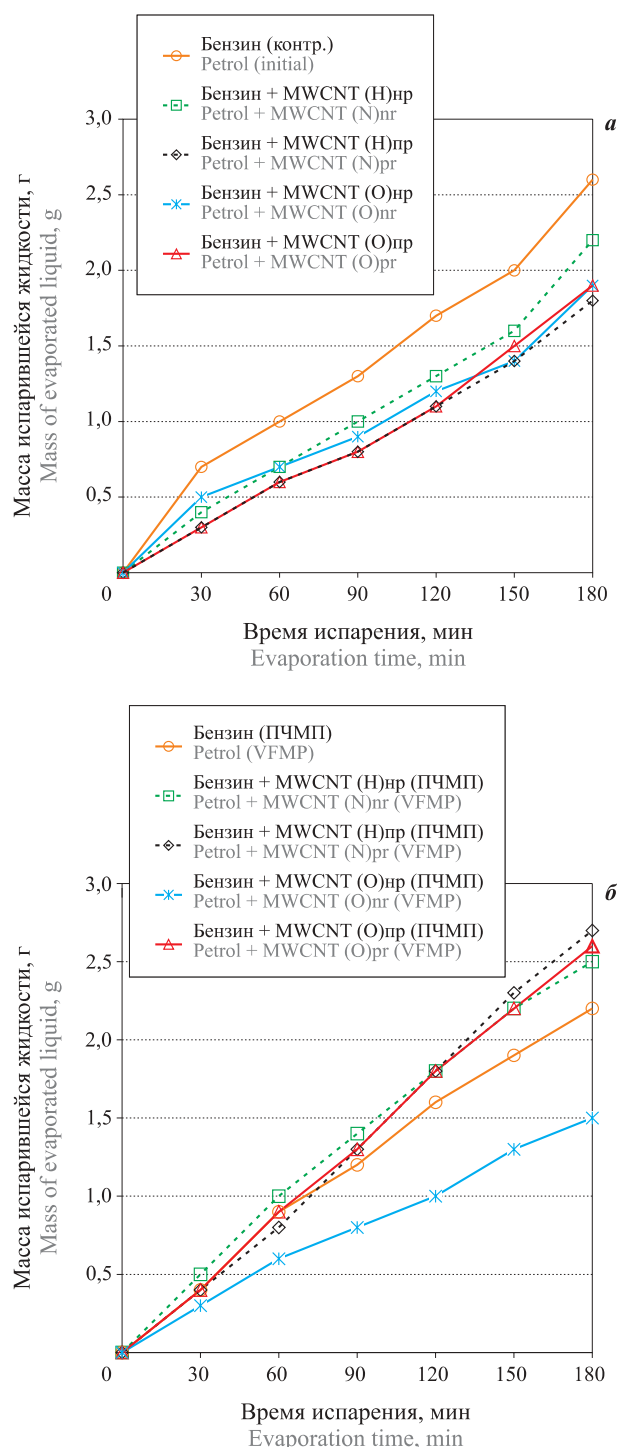


Рис. 7. Коэффициент поверхностного натяжения  $\sigma$  (□) и время истечения наножидкостей  $\Delta V/\Delta\tau$  (—) на основе керосина ТС-1 без воздействия ПЧМП (■) и при его воздействии (■)

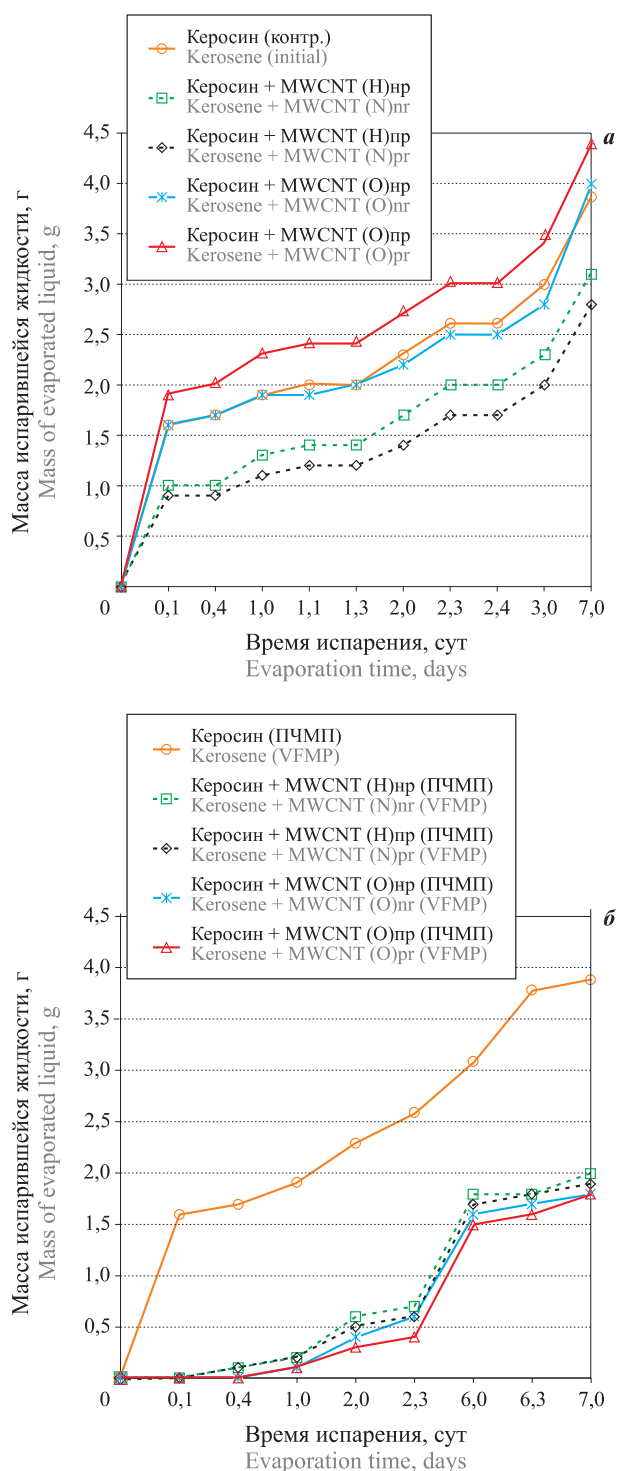
Fig. 7. Coefficient of surface tension  $\sigma$  (□) and the expiration time of nanofluids  $\Delta V/\Delta\tau$  (—) based on kerosene TS-1 without affecting VFMP (■) and with affecting VFMP (■)



**Рис. 8.** Масса испарившейся с открытой поверхности наножидкости на основе бензина НЕФРАС C2-80/120: *a* — без электрофизического воздействия; *б* — при воздействии ПЧМП  
**Fig. 8.** The amount of evaporated nanofluid based on petrol NEFRAS C2-80/120 on evaporation from an exposed surface: *a* — without electrophysical influence; *b* — under the influence of VFMP

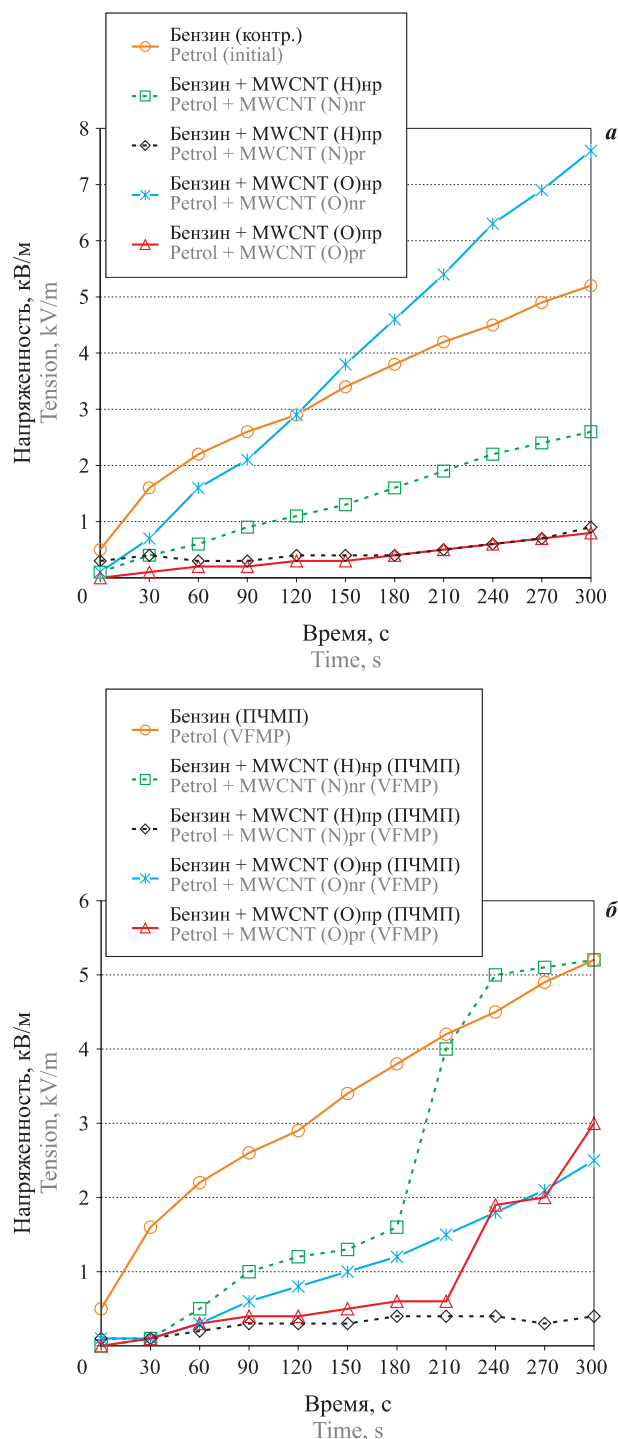
#### Исследование процессов электризации жидкостей в условиях ультразвуковой гомогенизации

Результаты измерений напряженности электрического поля при гомогенизации наножидкостей на



**Рис. 9.** Масса испарившейся с открытой поверхности наножидкости на основе керосина ТС-1: *a* — без электрофизического воздействия; *б* — при воздействии ПЧМП  
**Fig. 9.** Amount of evaporated nanofluid based on kerosene TS-1 upon evaporation from an open surface: *a* — without electrophysical influence; *b* — under the influence of VFMP

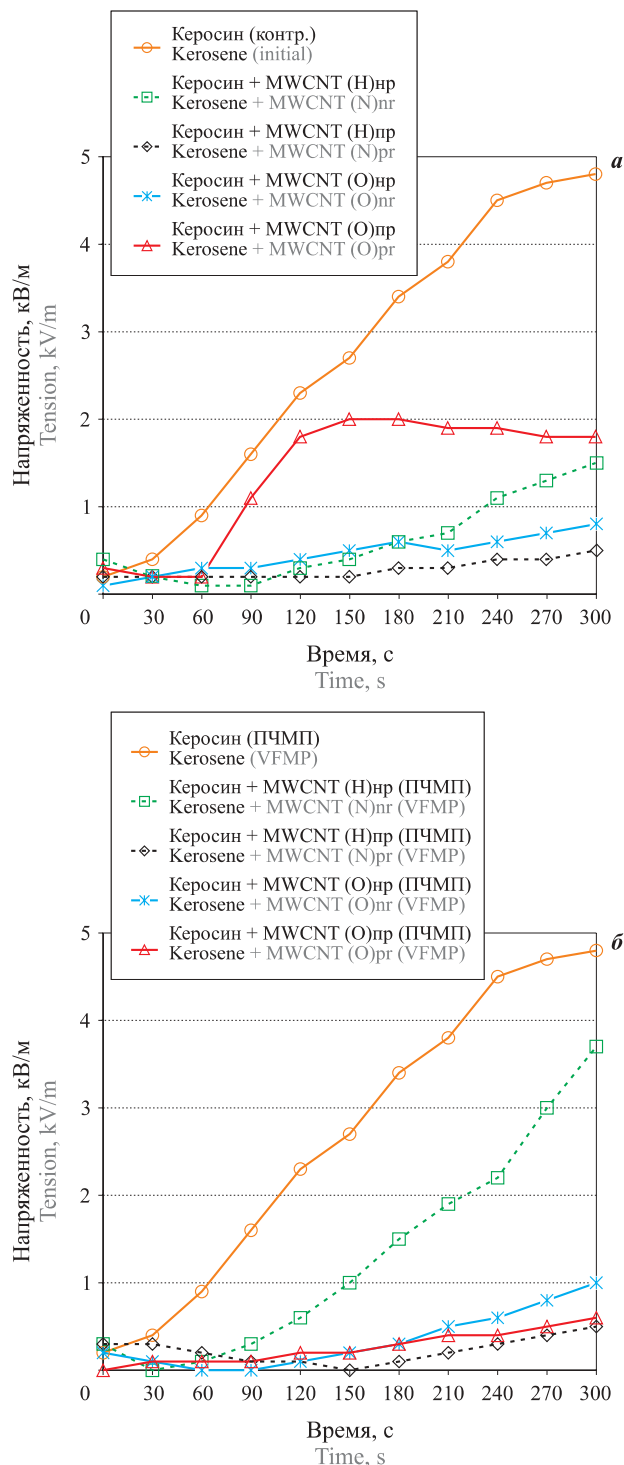
основе бензина НЕФРАС C2-80/120 и керосина ТС-1 представлены на рис. 10 и 11. Практически для всех образцов наножидкостей наблюдалась более низкая скорость электризации по сравнению с базовыми жидкостями, что свидетельствует об их более высокой



**Рис. 10.** Напряженность электрического поля при гомогенизации наножидкостей на основе бензина НЕФРАС С2-80/120: *a* — без электрофизического воздействия; *б* — при воздействии ПЧМП

Fig. 10. Electric field strength during homogenization of nanofluids based on petrol NEFRAS C2-80/120: *a* — without electrophysical influence; *b* — under the influence of VFMP

удельной электропроводности (менее  $10^{10}$  Ом·м). Вместе с тем для отдельных наножидкостей, содержащих наноматериал, полученный из нерастворенного осадка (MWCNT (H)np и MWCNT (O)np), наблюдалась более высокая скорость электризации,



**Рис. 11.** Напряженность электрического поля при гомогенизации наножидкостей на основе керосина ТС-1: *a* — без электрофизического воздействия; *б* — при воздействии ПЧМП

Fig. 11. Electric field strength during homogenization of nanofluidic liquids based on kerosene TS-1: *a* — without electrophysical influence; *b* — under the influence of VFMP

что, предположительно, связано со снижением электропроводности наножидкостей до величины порядка  $10^{11}$  Ом·м.

При электрофизическом воздействии происходит дополнительное снижение электризации нано-

жидкостей, что может быть объяснено воздействием ПЧМП на процессы электризации [19], а также стабилизацией наночастиц в базовых углеводородных жидкостях.

### Выводы

1. Реагентная модификация наноструктур позволяет повысить качество углеродного наноматериала для его использования в качестве элемента антистатической присадки для углеводородных жидкостей.

2. Изменение поверхностного натяжения, скорости истечения и интенсивности испарения углеводородных жидкостей посредством введения в них наноматериалов с MWCNT позволяет снизить ве-

роятность возникновения взрывоопасных концентраций в технологических аппаратах с ЛВЖ и ГЖ.

3. Наножидкости с MWCNT, полученными с использованием центрифугирования, характеризуются более высокой стабильностью. Процесс гомогенизации наножидкостей на основе MWCNT (Н)пр и MWCNT (О)пр характеризуется более низкой скоростью роста напряженности электрического поля, что способствует снижению вероятности искровых разрядов СЭ.

4. Электрофизическое воздействие посредством ПЧМП позволяет оперативно управлять взрывопожароопасными свойствами углеводородных жидкостей при обращении с ними в условиях действующих технологических процессов.

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Верёвкин В. Н. Стандарты и нормы электростатической искробезопасности (ЭСИБ) // Энергобезопасность и энергосбережение. — 2008. — № 4. — С. 41–48.
2. Попов Б. Г., Веревкин В. Н., Бондарь В. А., Горшков В. И. Статическое электричество в химической промышленности / Под ред. Б. И. Сажина. — Изд. 2-е, перераб. и доп. — Л.: Химия, 1977. — 240 с.
3. Хайдаров А. Ф., Климентова Г. Ю. Компоненты антистатических присадок к дизельному топливу // Вестник Казанского технологического университета. — 2014. — Т. 17, № 1. — С. 266–267.
4. Бобровский С. А., Яковлев Е. И. Защита от статического электричества в нефтяной промышленности. — М.: Недра, 1983. — 160 с.
5. Горových О. Г., Оразбаев А. Р. Определение времени релаксации объемного электростатического заряда, вносимого в резервуары с поступающей диэлектрической углеводородной жидкостью // Вестник Полоцкого государственного университета. Серия С. Фундаментальные науки. — 2015. — № 4. — С. 66–70.
6. Foygel M., Morris R. D., Anez D., French S., Sobolev V. L. Theoretical and computational studies of carbon nanotube composites and suspensions: Electrical and thermal conductivity // Physical Review B. — 2005. — Vol. 71, No. 10. — P. 104201. DOI: 10.1103/PhysRevB.71.104201.
7. Baby T. T., Ramaprabhu S. Investigation of thermal and electrical conductivity of graphene based nanofluids // Journal of Applied Physics. — 2010. — Vol. 108, No. 12. — P. 124308. DOI: 10.1063/1.3516289.
8. Kole M., Dey T. K. Investigation of thermal conductivity, viscosity, and electrical conductivity of graphene based nanofluids // Journal of Applied Physics. — 2013. — Vol. 113, No. 8. — P. 084307. DOI: 10.1063/1.4793581.
9. Панин Ю. В., Прилепо Ю. П., Торба Ж. Н., Чуйко А. Г. Исследование электрической проводимости в спиртовых суспензиях многослойных углеродных нанотрубок // Вестник Воронежского государственного технического университета. — 2012. — Т. 8, № 2. — С. 70–72.
10. Иванов А. В., Ивахнюк Г. К., Медведева Л. В. Методы управления свойствами углеводородных жидкостей в задачах обеспечения пожарной безопасности // Пожаровзрывобезопасность / Fire and Explosion Safety. — 2016. — Т. 25, № 9. — С. 30–37. DOI: 10.18322/PVB.2016.25.09.30-37.
11. Бобринецкий И. И., Неволин В. К., Симунин М. М. Технология производства углеродных нанотрубок методом каталитического пиролиза этанола из газовой фазы // Химическая технология. — 2007. — Т. 8, № 2. — С. 58–62.
12. Удовицкий В. Г. Методы оценки чистоты и характеристики свойств углеродных нанотрубок // Физическая инженерия поверхности. — Т. 7, № 4. — С. 351–373.
13. ТУ 2319-006-71371272-2006. Растворители нефтяные. Фасовка. Упаковка. Маркировка. Транспортирование и хранение. — СПб.: Нефтехим, 2006 — 1 с.
14. ТУ 38.401-67-108-92. Бензин-растворитель для резиновой промышленности. Технические условия. — Уфа: Нефтехим, 1992. — 31 с.
15. ТУ 2319-004-71371272-2006. Керосин. Фасовка. Упаковка. Маркировка. Транспортирование и хранение. — СПб.: Нефтехим, 2006 — 1 с.

16. Пат. 2479005 Российская Федерация. МПК G05B 24/02 (2006.01), H03B 28/00 (2006.01). Способ и устройство управления физико-химическими процессами в веществе и на границе раздела фаз / Ивахнюк Г. К., Матюхин В. Н., Клачков В. А., Шевченко А. О., Князев А. С., Ивахнюк К. Г., Иванов А. В., Родионов В. А. — № 2011118347/08; заявл. 21.01.2010; опубл. 10.04.2013, Бюл. № 10. URL: <http://www.freepatent.ru/patents/2479005> (дата обращения: 10.04.2017).
17. Сизов Е. Г., Беховых Ю. В. Механика и молекулярная физика: лабораторный практикум : учебное пособие. — Барнаул : Изд-во АГАУ, 2011. — 108 с.
18. Гарифуллин Р. Р., Симонова М. А., Зыков А. В., Иванов А. В. Оценка воздействия электрофизической обработки на физико-химические свойства нефтепродуктов // Экология и развитие общества. — 2013. — № 1(7). — С. 29–31.
19. Симонова М. А. Электрофизический способ снижения пожарной опасности хранения и транспортировки углеводородных топлив : дис. ... канд. техн. наук. — СПб., 2011. — 123 с.

*Материал поступил в редакцию 24 апреля 2017 г.*

**Для цитирования:** Иванов А. В., Сорокин А. Ю., Ивахнюк Г. К., Демехин Ф. В. Управление электростатическими свойствами жидких углеводородов, модифицированных углеродными наноструктурами // Пожаровзрывобезопасность / Fire and Explosion Safety. — 2017. — Т. 26, № 7. — С. 16–27. DOI: 10.18322/PVB.2017.26.07.16-27.

English

## MANAGEMENT OF ELECTROSTATIC PROPERTIES HYDROCARBON LIQUIDS BY MODIFICATION WITH CARBON NANOSTRUCTURES

**IVANOV A. V.**, Candidate of Technical Sciences, Docent of Department of Fire Safety of Technological Processes and Production, Saint Petersburg University of State Fire Service of Emercom of Russia (Moskovskiy Avenue, 149, Saint Petersburg, 196105, Russian Federation; e-mail: [spark002@mail.ru](mailto:spark002@mail.ru))

**SOROKIN A. Yu.**, Adjunct of Department of Fire Safety of Technological Processes and Production, Saint Petersburg University of State Fire Service of Emercom of Russia (Moskovskiy Avenue, 149, Saint Petersburg, 196105, Russian Federation; e-mail: [aleksey.sorokin.1987@list.ru](mailto:aleksey.sorokin.1987@list.ru))

**IVAKHNYUK G. K.**, Doctor of Chemical Sciences, Professor, Professor of Department of Engineering Protection of Environment, Saint Petersburg State Technology Institute (Moskovskiy Avenue, 26, Saint Petersburg, 190013, Russian Federation; e-mail: [fireside@inbox.ru](mailto:fireside@inbox.ru))

**DEMEKHIN F. V.**, Doctor of Technical Sciences, Professor of Department of Fire Safety of Technological Processes and Production, Saint Petersburg University of State Fire Service of Emercom of Russia (Moskovskiy Avenue, 149, Saint Petersburg, 196105, Russian Federation; e-mail: [demehin@yandex.ru](mailto:demehin@yandex.ru))

### ABSTRACT

In processes of filling, draining and transportation of hydrocarbon liquids in tanks and tanks, spraying is resulted by their electrization that promotes emergence of static electricity. Electrostatic discharges are capable to ignite mixes of combustible steams with air or other oxidizers that is one of origins of the fires and explosions in technological devices.

One of the modern directions of development of technologies is creation of nanofluids on the basis of carbon nanoparticles, including MWCNT with adjustable parameters warm and the mass transfer. Nanofluids represent suspensions with small concentration of particles of the firm phase.

In work electrophysical properties of the modified hydrocarbon liquids were investigated: NEFRAS C2-80/120 gasoline and kerosene of TS-1. Modification consisted in dispersion in liquids

of the carbon nanomaterials supporting MWCNT which were received by method of catalytic pyrolysis on the “CVDomna”. MWCNT are the functionalization by the reagent method, and their structures are investigated by method of the Raman spectroscopy. Electrophysical modification was carried out by impact on the studied structures of VFMP.

It is established that the coefficient of surface tension of the modified hydrocarbon liquids on the basis of NEFRAS C2-80/120 gasoline increased for 6...25 %, and time of drop falling increased by 10–18 %. In the conditions of influence of VFMP of value of coefficient of surface tension of nanofluids preferential decreases by 3...5 %, but expiration time at the same time also increases by 12...15 %. Values of coefficient of surface tension for nanofluids on the basis of kerosene of TS-1 increased up to 6 %. For values of time of the expiration increase in values by 10...24 % was observed. In the conditions of electrophysical impact additional reduction of value of coefficient of surface tension by 4...6 %, and also insignificant increase in exhaust speed by 3...5 % is observed.

Values of time of evaporation of the modified nanofluids from the open surface are received, at the same time decrease in intensity of evaporation on average by 30 % for NEFRAS C2-80/120 gasoline was observed. For kerosene of TS-1 decrease in intensity of evaporation to 38 % depending on the used MWCNT was observed that can be explained with sorption properties of substances. At electrophysical influence intensity of evaporation of nanofluids on the basis of NEFRAS C2-80/120 gasoline approaches the values corresponding to basic liquid, and on the basis of kerosene of TS-1 there is the considerable decrease — by 3.1 times.

At the research of processes of electrization of hydrocarbon liquids in the conditions of ultrasonic homogenization practically for all samples of nanofluids lower speed of electrization in comparison with basic liquids was observed that testifies to their higher direct-current conductivity. At electrophysical impact there is the additional decrease in electrization of nanofluids that can be connected with impact of VFMP on electrization processes, and also stabilization of nanoparticles in basic hydrocarbon liquids.

The received results speak about the possibility of decrease in probability of emergence of explosive concentration in technological devices with hydrocarbon liquids at introduction of nanomaterials to them with MWCNT. Process of homogenization of nanofluids with MWCNT is characterized by lower growth rate of electric field intensity that in turn promotes decrease in probability of spark discharges of static electricity. Electrophysical impact by means of VFMP allows to manage quickly fire and explosion hazardous properties of hydrocarbon liquids in the conditions of the operating technological processes.

**Keywords:** nanofluids; static electricity; electrostatic intrinsic safety; hydrocarbon fluids; multilayered carbon nanotubes; variable frequency-modulated potential.

## REFERENCES

1. Veryovkin V. N. Standards and norms electrostatic spark protection. *Energobezopasnost i energosberezheniye / Energy Safety and Energy Economy*, 2008, no. 4, pp. 41–48 (in Russian).
2. Popov B. G., Veryovkin V. N., Bondar V. A., Gorshkov V. I. *Sticheskoye elektrichestvo v khimicheskoy promyshlennosti. Izd. 2-e* [Static electricity in the chemical industry. 2<sup>nd</sup> ed.] Leningrad, Khimiya Publ., 1977. 240 p. (in Russian).
3. Khaidarov A. F., Klimentova G. Yu. Components of antistatic additives to diesel fuel. *Vestnik Kazanskogo tekhnologicheskogo universiteta / Herald of Kazan Technological University*, 2014, vol. 17, no. 1, pp. 266–267 (in Russian).
4. Bobrovskiy S. A., Yakovlev E. I. *Zashchita ot staticheskogo elektrichestva v neftyanoy promyshlennosti* [Protection from static electricity in the oil industry]. Moscow, Nedra Publ., 1983. 160 p. (in Russian).
5. Gorovykh O. G., Orazbaev A. R. Time specification of volume electrostatic charge relaxation brought in tanks with dielectric hydrocarbonic liquid. *Vestnik Polotskogo gosudarstvennogo universiteta. Seriya C. Fundamentalnyye nauki / Herald of Polotsk State University. Series C. Fundamental Sciences*, 2015, no. 4, pp. 66–70 (in Russian).
6. Foygel M., Morris R. D., Anez D., French S., Sobolev V. L. Theoretical and computational studies of carbon nanotube composites and suspensions: Electrical and thermal conductivity. *Physical Review B*, 2005, vol. 71, no. 10, p. 104201. DOI: 10.1103/PhysRevB.71.104201.

7. Baby T. T., Ramaprabhu S. Investigation of thermal and electrical conductivity of graphene based nano-fluids. *Journal of Applied Physics*, 2010, vol. 108, no. 12, p. 124308. DOI: 10.1063/1.3516289.
8. Kole M., Dey T. K. Investigation of thermal conductivity, viscosity, and electrical conductivity of graphene based nanofluids. *Journal of Applied Physics*, 2013, vol. 113, no. 8, p. 084307. DOI: 10.1063/1.4793581.
9. Panin Yu. V., Prilepo Yu. P., Torba J. N., Chuiko A. G. Study of electrical conductivity in alcohol suspensions of multilayer carbon nanotubes. *Vestnik Voronezhskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta / The Bulletin of Voronezh State Technical University*, 2012, vol. 8, no. 2, pp. 70–72 (in Russian).
10. Ivanov A. V., Ivakhnyuk G. K., Medvedeva L. V. Methods of control properties of hydrocarbon liquids in the problems of fire safety. *Pozharovzryvobezopasnost / Fire and Explosion Safety*, 2016, vol. 25, no. 9, pp. 30–37 (in Russian). DOI: 10.18322/PVB.2016.25.09.30-37.
11. Bobrinetskiy I. I., Nevolin V. K., Simunin M. M. Technology of production of carbon nanotubes by the method of catalytic pyrolysis of ethanol from the gas phase. *Khimicheskaya tekhnologiya / Chemical Technology*, 2007, vol. 8, no. 2, pp. 58–62 (in Russian).
12. Udovitskiy V. G. Methods for estimating the purity and characterization of the properties of carbon nanotubes. *Fizicheskaya inzheneriya poverkhnosti / Physical Surface Engineering*, 2009, vol. 7, no. 4, pp. 351–373 (in Russian).
13. Specifications 2319-006-71371272–2006. *Solvents petroleum. Packing. Packaging. Marking. Transportation and storage*. Saint Petersburg, Neftekhim Publ., 2006. 1 p. (in Russian).
14. Specifications 38.401-67-108–92. *Benzene-solvent for rubber industry. Specifications*. Ufa, Neftekhim Publ., 1992. 31 p. (in Russian).
15. Specifications 2319-004-71371272–2006. *Kerosene. Packing. Packaging. Marking. Transportation and storage*. Saint Petersburg, Neftekhim Publ., 2006. 1 p. (in Russian).
16. Ivakhnjuk G. K., Matjukhin V. N., Klachkov V. A., Shevchenko A. O., Knjazev A. S., Ivakhnjuk K. G., Ivanov A. V., Rodionov V. A. *Method and apparatus for controlling physical-chemical processes in substance and on a phase boundary*. Patent RU, no. 2479005, publ. date 10.04.2013 (in Russian).
17. Sizov E. G., Bekhovykh Yu. V. *Mekhanika i molekulyarnaya fizika: laboratornyy praktikum* [Mechanics and molecular physics: laboratory workshop]. Barnaul, Altai State Agricultural University Publ., 2011. 108 p. (in Russian).
18. Garifulin R. R., Simonova M. A., Zykov A. V., Ivanov A. V. An assessment of impact of electrophysical processing on physical and chemical qualities of mineral oils. *Ekologiya i razvitiye obshchestva / Ecology and Development of Society*, 2013, no. 1(7), pp. 29–31 (in Russian).
19. Simonova M. A. *Electrophysical method of reducing the fire hazard of storage and transportation of hydrocarbon fuels*. Cand. tech. sci. diss. St. Petersburg, 2011. 123 p. (in Russian).

**For citation:** Ivanov A. V., Sorokin A. Yu., Ivakhnyuk G. K., Demekhin F. V. Management of electrostatic properties hydrocarbon liquids by modification with carbon nanostructures. *Pozharovzryvobezopasnost / Fire and Explosion Safety*, 2017, vol. 26, no. 7, pp. 16–27 (in Russian). DOI: 10.18322/PVB.2017.26.07.16-27.

**И. Г. МАЛЫГИН**, д-р техн. наук, профессор, профессор кафедры организации пожаротушения и проведения аварийно-спасательных работ, Санкт-Петербургский университет ГПС МЧС России (Россия, 196105, г. Санкт-Петербург, Московский просп., 149); директор Института проблем транспорта им. Н. С. Соломенко РАН (Россия, 199178, г. Санкт-Петербург, 12-я линия ВО, 13; e-mail: info@iptran.ru)

**А. А. ТАРАНЦЕВ**, д-р техн. наук, профессор, профессор кафедры организации пожаротушения и проведения аварийно-спасательных работ, Санкт-Петербургский университет ГПС МЧС России (Россия, 196105, г. Санкт-Петербург, Московский просп., 149); заведующий лабораторией Института проблем транспорта им. Н. С. Соломенко РАН (Россия, 199178, г. Санкт-Петербург, 12-я линия ВО, 13; e-mail: info@iptran.ru)

**С. А. ИВАНОВ**, начальник подразделения, Санкт-Петербургский университет ГПС МЧС России (Россия, 196105, г. Санкт-Петербург, Московский просп., 149; e-mail: fuchika10@mail.ru)

**К. А. НАУМУШКИНА**, слушатель, Санкт-Петербургский университет ГПС МЧС России (Россия, 196105, г. Санкт-Петербург, Московский просп., 149; e-mail: naumushkina.ksenia@yandex.ru)

**А. А. СТОЛЯРОВА**, магистрант Института транспортной техники и систем управления, Московский государственный университет путей сообщения Императора Николая II (Россия, 127994, г. Москва, ул. Образцова, 9, стр. 9; e-mail: anvlst@rambler.ru)

УДК 614.83+656.2+656.08

## ОБ ОБЕСПЕЧЕНИИ ПОЖАРНОЙ БЕЗОПАСНОСТИ ДВУХЭТАЖНЫХ ВАГОНОВ

Рассмотрены вопросы обеспечения пожарной безопасности железнодорожных пассажирских вагонов перспективного типа — двухэтажных. Проанализированы особенности их конструкции с точки зрения вероятности возникновения и развития пожара. Построена компьютерная модель для различных сценариев пожара в двухэтажном вагоне; оценена динамика развития опасных факторов пожара. Выполнена оценка времени блокирования путей эвакуации с этажей вагона повышенной температурой и задымлением. Показано, что наиболее проблемным с точки зрения безопасности пассажиров при пожаре является второй этаж вагона. Предложены пути обеспечения пожарной безопасности вагонов данного типа.

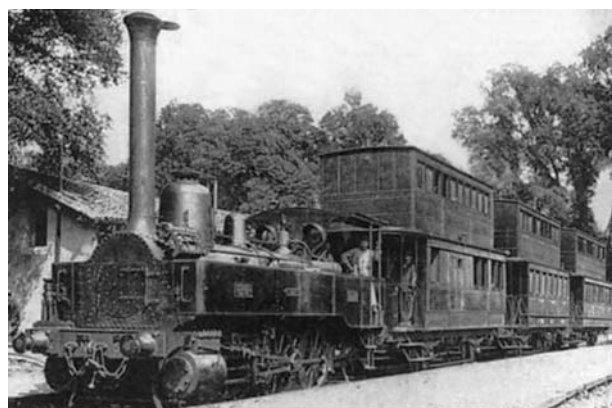
**Ключевые слова:** железнодорожный транспорт; двухэтажный вагон; пожарная безопасность; математическое моделирование; эвакуация.

**DOI:** 10.18322/PVB.2017.26.07.28-38

### Введение

Исторически двухэтажные пассажирские вагоны начали эксплуатироваться на железных дорогах Европы еще с XIX века (рис. 1) и широко применяются до сих пор во многих странах (рис. 2). Некоторые образцы двухэтажных вагонов были закуплены Россией во Франции и стали производиться на отечественных заводах (рис. 3). Однако в СССР, а затем в России они не получили широкого распространения вплоть до начала XXI в.

В настоящее время ОАО «РЖД» в интересах повышения качества обслуживания пассажиров производит замену пассажирских плацкартных вагонов на двухэтажные купейные [1] производства ОАО «Тверской вагоностроительный завод» (рис. 4). Такие вагоны в настоящее время начали широко исполь-



**Рис. 1.** Двухэтажный поезд, созданный в 1876 г. в Европе А. Малетом

**Fig. 1.** The double-decker train created in 1876 in Europe by A. Malet



Рис. 2. Современные двухэтажные вагоны — индийский (а) и высокоскоростной японский (б)

Fig. 2. Modern double-decker cars — Indian (a) and high-speed Japanese (b)

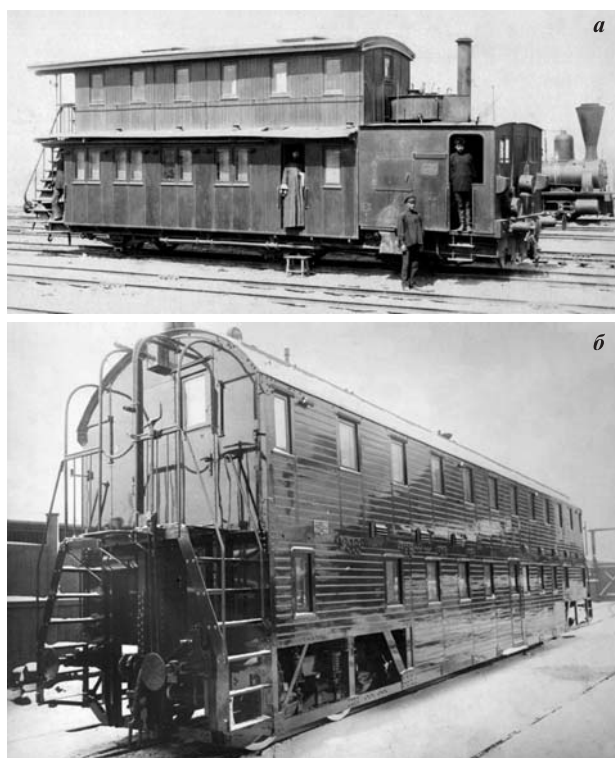


Рис. 3. Отечественные образцы двухэтажных вагонов Коломенского (а) и Сормовского (б) заводов

Fig. 3. Domestic samples of double-decker cars of Kolomna (a) and Sormovsky (b) plants

зоваться на Октябрьской железной дороге [2] для сообщения между двумя столицами — Москвой и Санкт-Петербургом.

В связи с этим целью настоящей статьи является рассмотрение вопросов, связанных с обеспечением пожарной безопасности [3] двухэтажных вагонов, так как существует риск их возгорания (рис. 5).

Это, в свою очередь, предполагает необходимость решения следующих задач: а) определения возможных сценариев пожара; б) исследования развития его опасных факторов (ОФП) [4]; в) эвакуации и спасения пассажиров и персонала; г) действий по тушению пожара [5].

Актуальность обеспечения пожарной безопасности на железнодорожном транспорте подтверждается также большим вниманием к этой проблеме зарубежных специалистов. В частности, анализируется риск возникновения пожаров [6], распространение дыма в вагонах [7] и эвакуация пассажиров из них [8].

### 1. Пожароопасность и системы противопожарной защиты двухэтажных вагонов

Как показывает опыт, причины возгорания пассажирских вагонов можно условно разделить на внутренние и внешние.

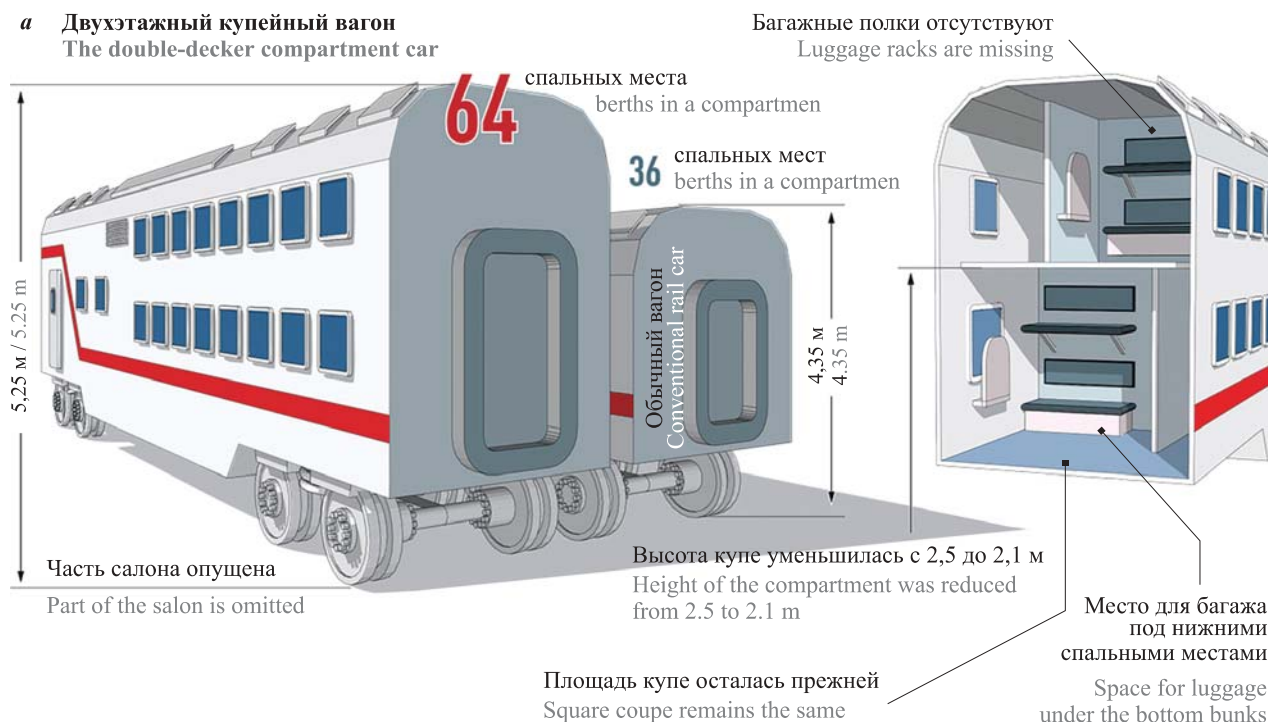
*Внутренние* причины связаны прежде всего с неисправностью электрооборудования. В двухэтажном вагоне установлены: печь СВЧ, кулер для питьевой воды, электрические водогреи, система управления дверьми, а также подключенные к электросети вагона камеры видеонаблюдения, видеорегистратор, контроллер информационных панелей КИП-2, антенно-фидерное устройство “БРИС”, датчики системы контроля температуры нагрева блока управления климатической системой (БУКС), индикаторы светодиодные процесса торможения, панель маршрутная и др. На каждого второго пассажира предусмотрена розетка переменного тока 220 В (в пассажирских купе — по 2 шт., в туалетах — по 1 шт., в служебном отделении — 2 шт., в бытовом отделении (для вагонов с двухместными купе) — 1 шт., в коридоре тормозного конца вагона — 1 шт., в большом коридоре первого и второго этажа — по 1 шт. Все это создает риск перегрузки электросети и, как следствие, риск короткого замыкания и последующего возгорания. Кроме того, нельзя не учитывать неосторожное обращение с огнем пассажиров и персонала, курение в неположенных местах.

К *внешним* причинам можно отнести искры, возникающие в контактной сети, от проходящего тепловоза и при торможении, а также открытое пламя на пути движения (ремонтные работы, костры, лесные пожары и др.).

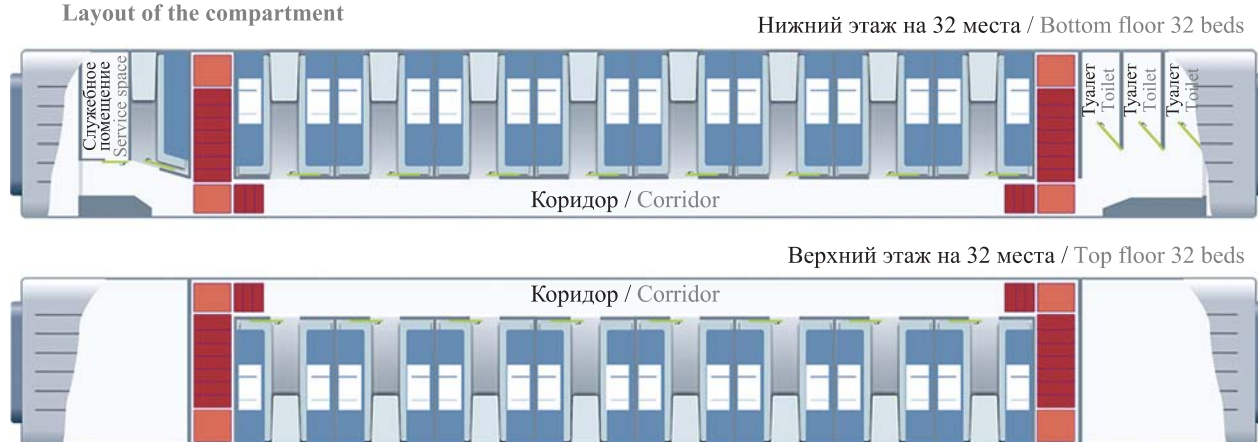
Эти факторы, наряду со сгораемой отделкой вагонов, постельным бельем и вещами, могут спровоцировать появление ОФП в купе, коридорах и тамбурах вагонов, приводящих к блокированию эвакуационных путей и тем самым к угрозе жизни и здоровью пассажиров и персонала.

Для снижения риска угрозы жизни пассажиров и персонала двухэтажный вагон оборудован авто-

**а** Двухэтажный купейный вагон  
The double-decker compartment car



**б** Схема расположения купе  
Layout of the compartment



**Рис. 4.** Двухэтажный вагон в сравнении с обычным вагоном (а) и планы этажей (б)

**Fig. 4.** The double-decker car in comparison with usual car (a) and plans of floors (b)



**Рис. 5.** Пожар в двухэтажном вагоне (а) и его тушение (б)

**Fig. 5.** Fire in double-decker railway car (a) and fire suppression (b)

матической системой пожарной сигнализации, самосрабатывающими огнетушителями типа ОСП, первичными средствами пожаротушения (огнетушители углекислотные порошкового типа) и системой водяного пожаротушения (пожарный рукав со стволом, катушка, кран и бак вместимостью 90 л). Это позволяет проводникам вагона и пассажирам, вовремя заметившим возгорание, замедлить распространение пожара и даже потушить его.

Тем не менее в случае опасности предусматривается эвакуация пассажиров, их спасение (особенно если среди них есть дети и люди с ограниченной мобильностью [9]) и самоспасение. Эвакуация с 1-го этажа проводится как из обычных вагонов — из купе по коридору в тамбуры, а оттуда либо через боковые двери наружу, либо через торцевые двери в соседние вагоны. Эвакуация со 2-го этажа несколько сложнее — из купе по коридору через лестницы вниз в тамбуры, а оттуда также либо через боковые двери наружу, либо через торцевые двери в соседние вагоны.

Спасение и самоспасение предусмотрено для пассажиров обоих этажей и осуществляется через окна — аварийные выходы (ОАВ) после их разбивания специальным молотком. На 1-м этаже ОАВ укомплектованы канатами с карабинами для закрепления за специальные скобы. На 2-м этаже ОАВ укомплектованы веревочными лестницами с карабинами для быстрого зацепления за кронштейны. Лестницы хранятся в запломбированных контейнерах в купе с ОАВ и в купе напротив ОАВ под правым от входа

нижним спальным местом. Для посадки/высадки людей группы мобильности М4 [9] (инвалиды, передвигающиеся на креслах-колясках, приводимых в движение вручную) в штабных вагонах предусмотрены специальные устройства грузоподъемностью 300 кг.

Однако на практике спасение и самоспасение через ОАВ может вызвать определенные трудности, особенно у пассажиров с ограниченной мобильностью [9]. К тому же пассажиры в экстремальной ситуации не всегда могут оперативно привести в рабочее состояние контейнер с веревочной лестницей.

Ситуацию усугубляет и то, что для двухэтажных вагонов число пассажирских мест по сравнению с обычным купейным вагоном увеличилось в 1,78 раза (с 36 мест до 64), а количество и размеры эвакуационных выходов остались прежними.

В связи с этим представляется необходимым провести моделирование распространения ОФП при различных сценариях пожара в двухэтажном вагоне и тем самым оценить резерв времени для проведения эвакуации, спасения и самоспасения пассажиров.

## 2. Математические модели развития пожара в двухэтажном вагоне

Ввиду более сложной планировки двухэтажного вагона по сравнению с обычными купейными вагонами (см. рис. 4) развитие пожара в нем сложно полностью описать интегральной моделью (ГОСТ 12.1.004–91\*, [10]). Применение зонной модели [10]

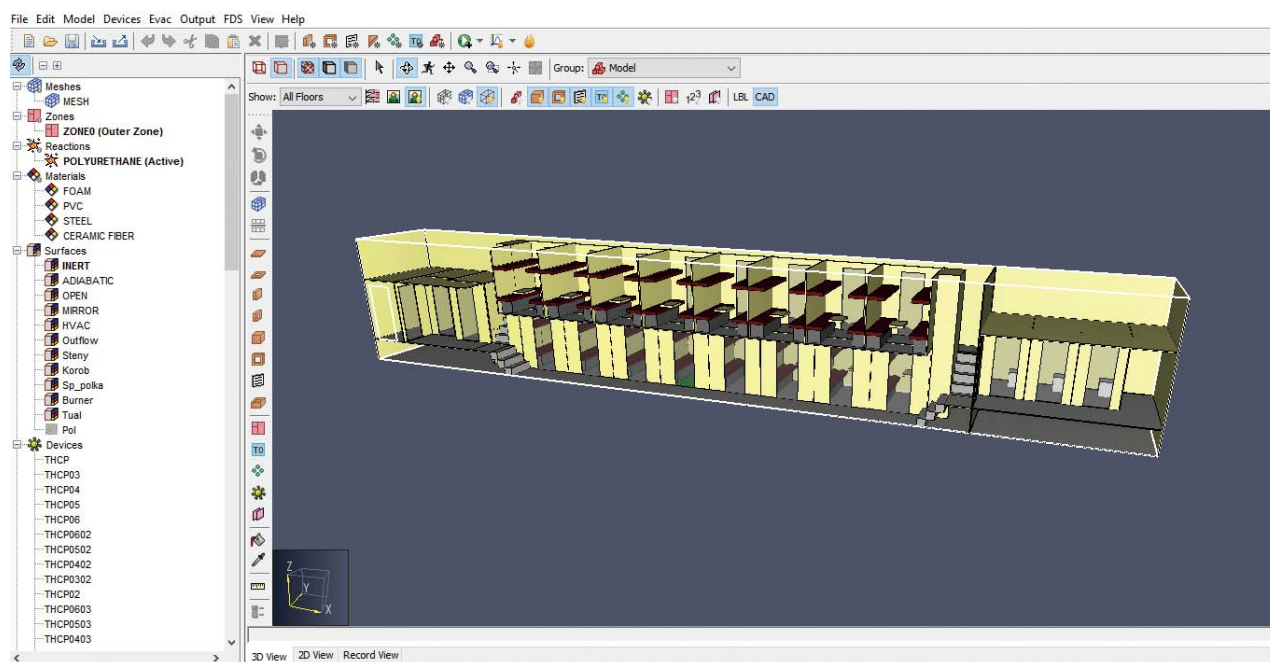


Рис. 6. Представление в программе PyroSim двухэтажного пассажирского купейного вагона (модель 61-4465) со спальными местами

Fig. 6. Representation in the PyroSim program of a double-decker passenger compartment car (model 61-4465) with berths

развития ОФП также представляется проблематичным. Наиболее приемлемой моделью является полевая, реализуемая, например, программой PyroSim (<http://www.thunderheadeng.com/pyrosim/>).

С помощью этой программы был смоделирован пассажирский двухэтажный купейный вагон (рис. 6) и проведена оценка распространения в нем ОФП (повышенной температуры окружающей среды и задымления) для четырех характерных сценариев возможного пожара — на 1-м этаже в среднем и крайнем купе и на 2-м этаже также в среднем и крайнем купе.

Представляется также целесообразным оценить время блокирования дымом  $t_{\text{бл}}$  выходов из коридоров этажей. Это можно сделать с использованием известного выражения [11, 12]:

$$t_{\text{бл}} = \frac{20F}{\Pi\sqrt{g}} \left( \frac{1}{\sqrt{h}} - \frac{1}{\sqrt{H}} \right), \quad (1)$$

где  $F$  — площадь этажа вагона,  $\text{м}^2$ ;

$\Pi$  — периметр очага пожара, м;

$g$  — ускорение свободного падения;  $g = 9,81 \text{ м/с}^2$ ;

$h$  — допустимая нижняя граница задымления, м;

$H$  — высота этажа вагона, м.

Поскольку периметр пожара  $\Pi$  также является функцией времени  $t$ , в случае его кругового развития на начальной стадии имеет место соотношение

$$\Pi(t) = 2\pi Vt, \quad (2)$$

где  $V$  — линейная скорость распространения пожара [13].

С учетом (2) выражение (1) принимает вид:

$$t_{\text{бл}} = \sqrt{\frac{10F}{\pi V\sqrt{g}}} \left( \frac{1}{\sqrt{h}} - \frac{1}{\sqrt{H}} \right). \quad (3)$$

Время  $t_{\text{бл}}$  целесообразно уточнить и по зонной модели [10], согласно которой динамика нижней границы дыма  $h(t)$  может быть определена из решения дифференциального уравнения

$$-\frac{dh}{dt} = C_1(t) \left[ h + \delta + 1,5\sqrt{S(t)} \right]^{5/3} + C_2(t), \quad (4)$$

где  $S(t)$  — динамика площади пожара,  $\text{м}^2$ ;

$\delta$  — высота расположения пожарной нагрузки, м;

$C_1(t)$ ,  $C_2(t)$  — динамические коэффициенты.

Величины  $C_1(t)$  и  $C_2(t)$ , в свою очередь, определяются из выражений [10]:

$$C_1(t) = \frac{0,21}{F} \sqrt[3]{gWS(t)(1-k_c)}; \quad (5)$$

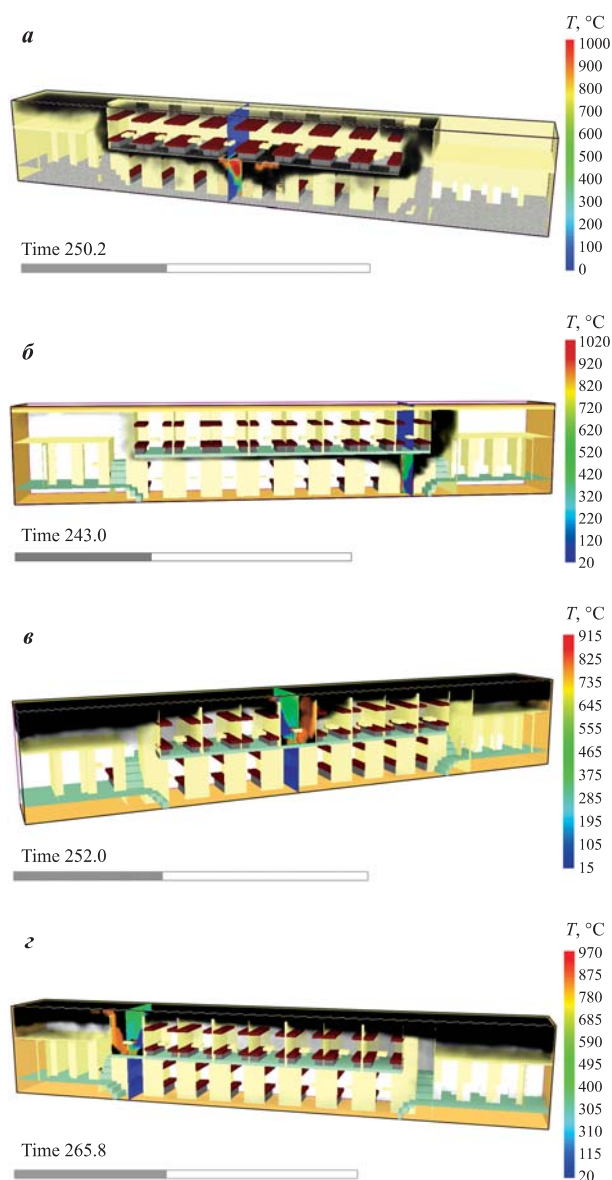
$$C_2(t) = \frac{WS(t)(1-k_o)}{F}, \quad (6)$$

где  $W$  — условная скорость,  $\text{м/с}$ ;  $W = q_n(C_p \rho_0 T_0)^{-1}$ ;  
 $q_n$  — удельная мощность пожара,  $\text{кВт/м}^2$ ;

$C_p$  — теплоемкость продуктов горения,  $\text{кДж/(кг}\cdot\text{К)}$ ;  
 $\rho_0$  — начальная плотность газовой среды,  $\text{кг/м}^3$ ;  
 $T_0$  — начальная температура газовой среды,  $\text{К}$ ;  
 $k_c$ ,  $k_o$  — коэффициенты теплопотерь соответственно в ограждения ( $k_c \approx 0,55$ ) и общие ( $k_o \approx 0,6$ ).

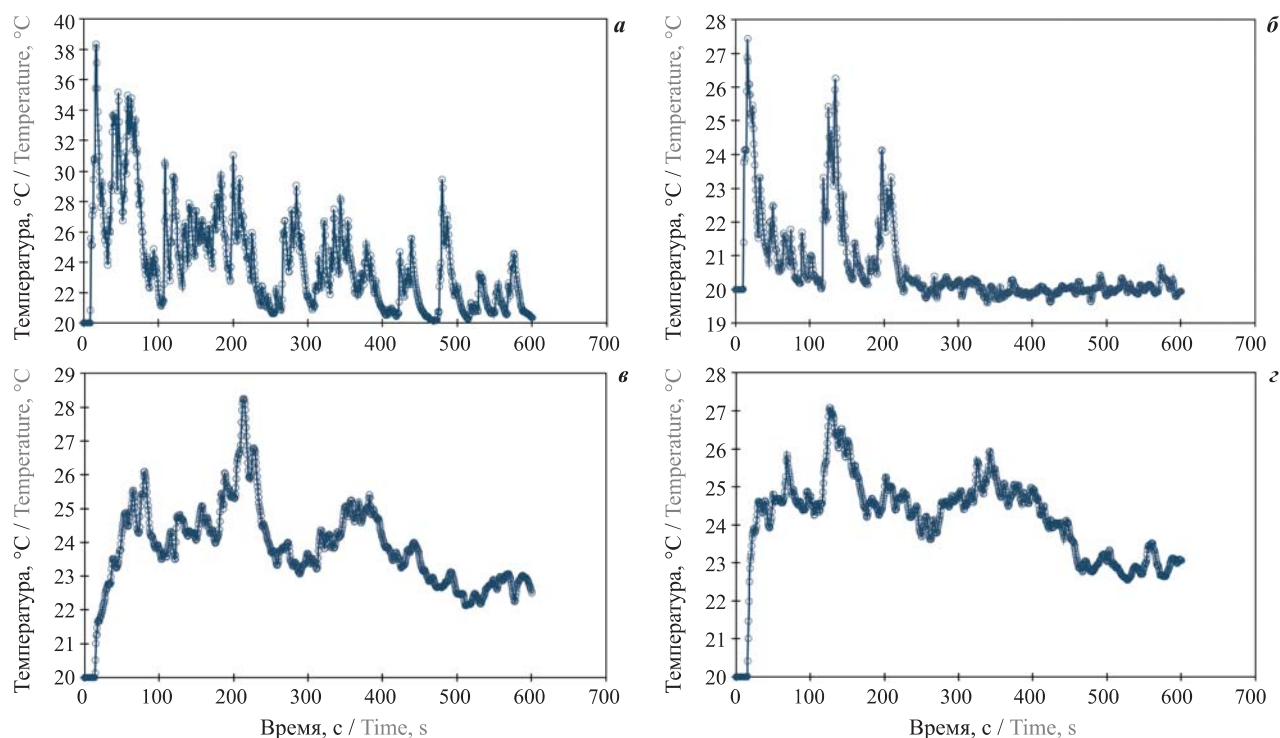
### 3. Результаты моделирования пожара в двухэтажном вагоне

С использованием программы PyroSim [11] был проведен комплекс расчетных оценок ОФП при различных сценариях пожара в двухэтажном вагоне (см. рис. 4 и 7). На рис. 8–11 представлена динамика



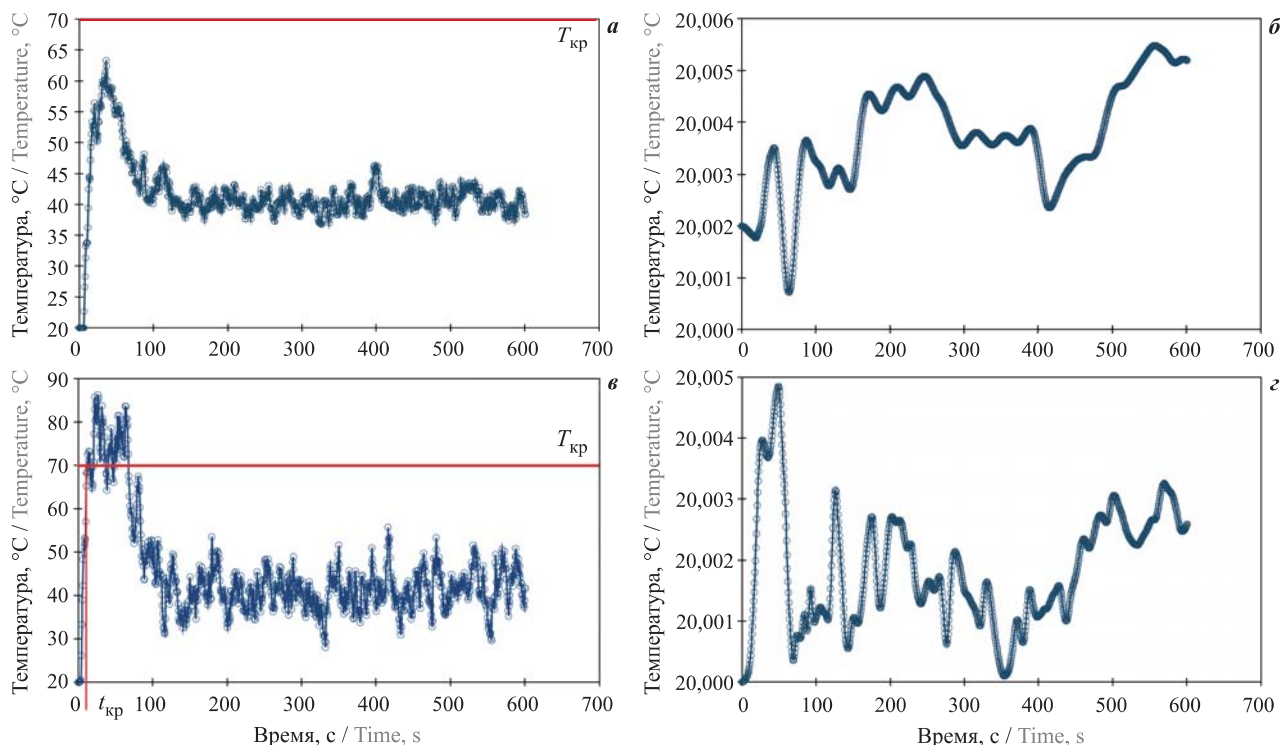
**Рис. 7.** Сценарии развития пожаров в двухэтажном вагоне (4-я минута пожара): а — на 1-м этаже в среднем купе; б — на 1-м этаже в крайнем купе; в — на 2-м этаже в среднем купе; г — на 2-м этаже в крайнем купе

**Fig. 7.** Scenarios of development of the fires in the double-decker car (the 4<sup>th</sup> minute of the fire): а — on the 1<sup>st</sup> floor on average coupe; б — on the 1<sup>st</sup> floor in an extreme coupe; в — on the 2<sup>nd</sup> floor on average coupe; г — on the 2<sup>nd</sup> floor in an extreme coupe



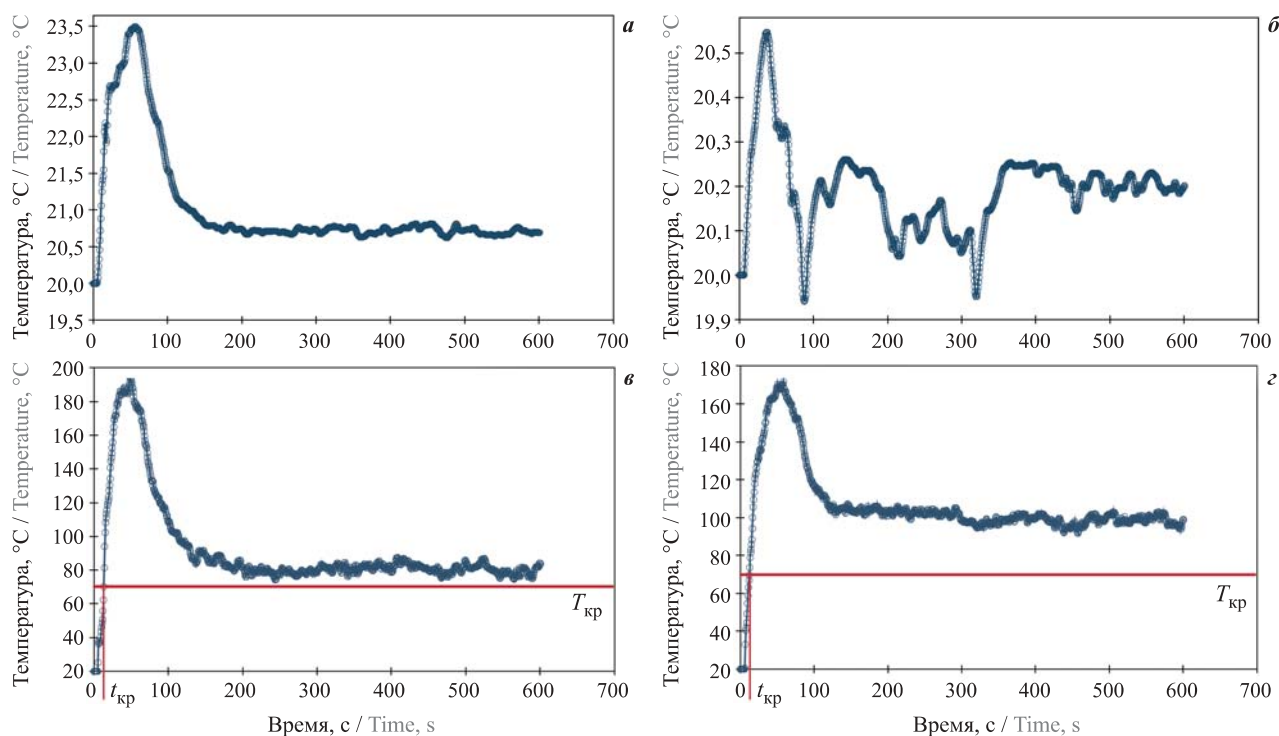
**Рис. 8.** Результаты моделирования температурного режима у выходов из коридоров при пожаре в среднем купе 1-го этажа (сценарий на рис. 7,а): а, в — у левых выходов с 1-го и 2-го этажей соответственно; б, г — у правых выходов с 1-го и 2-го этажей соответственно

**Fig. 8.** Results of modeling of temperature condition at exits from corridors at the fire on average a coupe of the 1<sup>st</sup> floor (the scenario in fig. 7,а): а, в — at the left exits from the 1<sup>st</sup> and 2<sup>nd</sup> floors respectively; б, г — at the right exits from the 1<sup>st</sup> and 2<sup>nd</sup> floors respectively



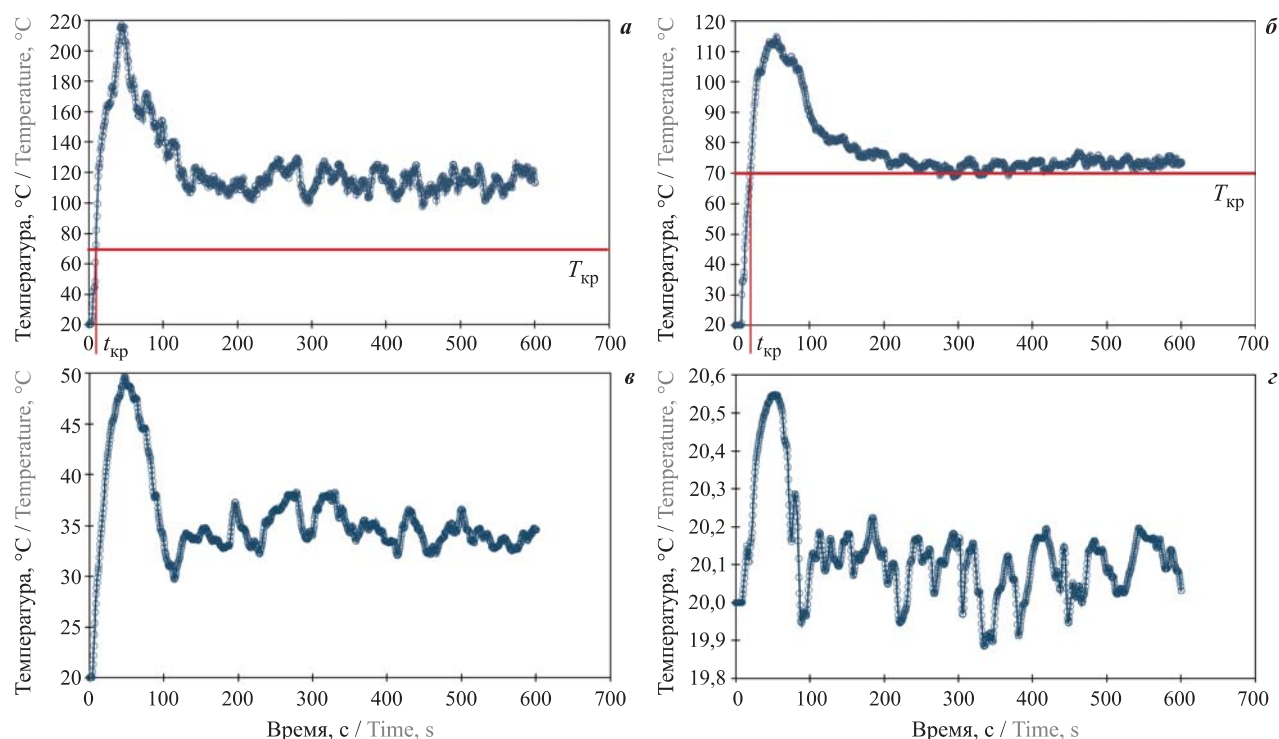
**Рис. 9.** Результаты моделирования температурного режима у выходов из коридоров при пожаре в крайнем левом купе 1-го этажа (сценарий на рис. 7,б, красная линия — 70 °С): а, в — у левых выходов с 1-го и 2-го этажей соответственно; б, г — у правых выходов с 1-го и 2-го этажей соответственно

**Fig. 9.** Results of modeling of temperature condition at exits from corridors at the fire in an extreme left coupe of the 1<sup>st</sup> floor (the scenario in fig. 7,б, the red line — 70 °С): а, в — at the left exits from the 1<sup>st</sup> and 2<sup>nd</sup> floors respectively; б, г — at the right exits from the 1<sup>st</sup> and 2<sup>nd</sup> floors respectively



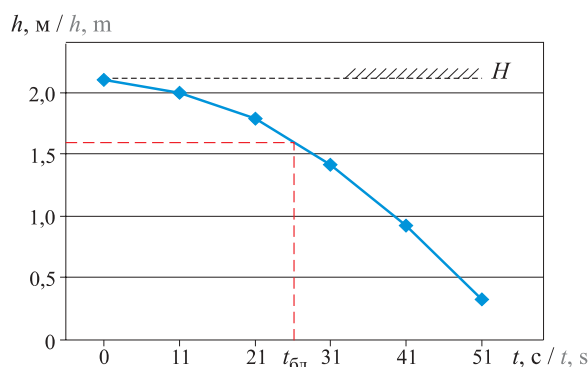
**Рис. 10.** Результаты моделирования температурного режима у выходов из коридоров при пожаре в центральном купе 2-го этажа (сценарий на рис. 7, в, красная линия 70 °C): а, в — у левых выходов с 1-го и 2-го этажей соответственно; б, г — у правых выходов с 1-го и 2-го этажей соответственно

**Fig. 10.** Results of modeling of temperature condition at exits from corridors at the fire in the central coupe of the 2<sup>nd</sup> floor (the scenario in fig. 7, v, the red line 70 °C): а, в — at the left exits from the 1<sup>st</sup> and 2<sup>nd</sup> floors respectively; б, г — at the right exits from the 1<sup>st</sup> and 2<sup>nd</sup> floors respectively



**Рис. 11.** Результаты моделирования температурного режима у выходов из коридоров при пожаре в левом крайнем купе 2-го этажа (сценарий на рис. 7, г): а, в — у левых выходов со 2-го и 1-го этажей соответственно; б, г — у правых выходов со 2-го и 1-го этажей соответственно

**Fig. 11.** Results of modeling of temperature condition at exits from corridors at the fire in the left extreme coupe of the 2<sup>nd</sup> floor (the scenario in fig. 7, g): а, в — at the left exits from the 2<sup>nd</sup> and 1<sup>st</sup> floors respectively; б, г — at the right exits from the 2<sup>nd</sup> and 1<sup>st</sup> floors respectively



**Рис. 12.** Динамика нижней границы дыма при пожаре на 2-м этаже вагона ( $q_n = 250 \text{ кВт/м}^2$ )

**Fig. 12.** Dynamics of the lower bound of smoke at the fire on the 2<sup>nd</sup> floor of the car ( $q_n = 250 \text{ kW/m}^2$ )

ка температурного режима в местах выхода из коридоров при сценариях пожара в соответствии с рис. 7 при начальной температуре на обоих этажах  $20^\circ\text{C}$ .

По выражению (3) дана оценка времени блокирования  $t_{\text{бл}}$  продуктами горения (дымом) эвакуационных выходов. Согласно документации на двухэтажные вагоны [1]  $F \approx 41,74 \text{ м}^2$  и  $H = 2,1 \text{ м}$ . Полагая, что  $h = 1,6 \text{ м}$  и  $V \approx 0,0033 \text{ м/с}$  [13, 14], из (3) получаем:

$$t_{\text{бл}} = \sqrt{\frac{10 \cdot 41,74}{\pi \cdot 0,0033 \sqrt{9,81} \left( \frac{1}{\sqrt{1,6}} - \frac{1}{\sqrt{2,1}} \right)}} \approx 22,56 \text{ с.}$$

Дифференциальное уравнение (4), соответствующее зонной модели [10], было решено численными методами [15] с учетом (5) и (6) при начальном условии  $h(t=0) = H$ . Предполагалось, что на начальной стадии пожара его площадь имеет круговую форму, т. е.  $S = \pi V^2 t^2$  [13, 14]. Результаты решения в виде зависимости  $h(t)$  приведены на рис. 12.

Поскольку предыдущие модели не учитывали неравномерность нижней границы дыма по длине вагона, было проведено моделирование задымления

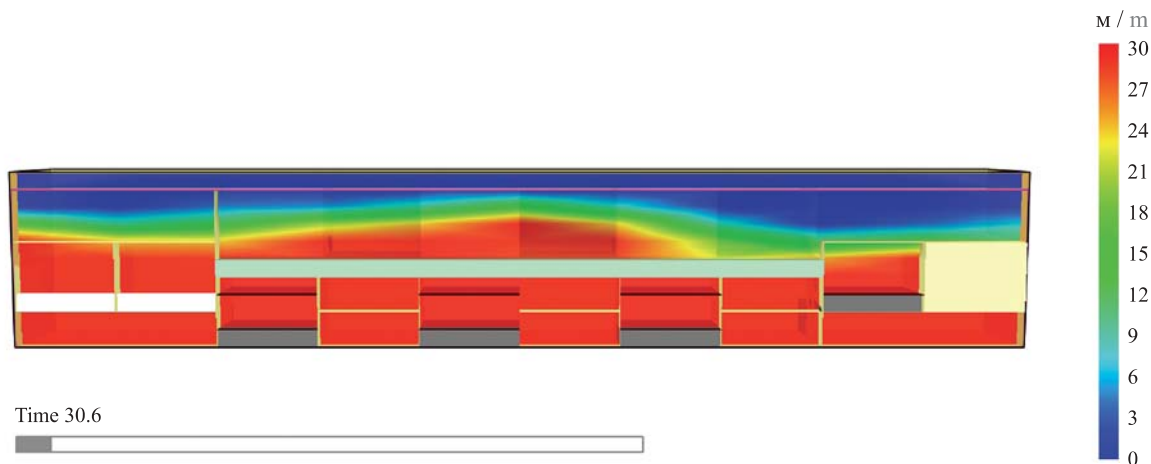
с использованием программы PyroSim (рис. 13), что также подтверждает эффект быстрого задымления этажа вагона при пожаре.

### Обсуждение результатов

Результаты компьютерного моделирования свидетельствуют о следующем. Пожар на 2-м этаже (будь он в центральном или крайнем купе) наиболее опасен для пассажиров этого этажа: температура у выходов из коридора быстро поднимается до  $70^\circ\text{C}$ , блокируя эвакуационные пути вниз. Этим пассажирам остается только спастись через ОАВ. Менее опасен пожар в крайнем купе 1-го этажа: у пассажиров 1-го и 2-го этажей есть возможность эвакуироваться через противоположный торец вагона. И наименее опасным с точки зрения температурного режима является пожар в центре 1-го этажа. В этом случае температура у обоих выходов из коридоров не поднимается до болевого порога.

Результаты расчетов с использованием различных моделей согласованно свидетельствуют о быстром задымлении этажа при пожаре в вагоне, что может представлять значительную опасность, особенно в ночное время, когда пассажиры спят и их эвакуация может начаться со значительной задержкой. В частности, как следует из рис. 12, время блокирования эвакуационных выходов из этажа вагона составляет порядка 25 с, что согласуется с результатом расчета по выражению (3).

Определенный интерес также представляет динамика задымления движущегося вагона при одном или нескольких открытых окнах. Важными факторами будут являться наличие и расположение открытых окон и место возникновения пожара в вагоне. Однако этот вопрос требует отдельного исследования, поскольку возможны сценарии как удаления дыма из этажа потоком наружного воздуха путем эжектирования, так и раздувания пламени.



**Рис. 13.** Моделирование потери видимости при задымлении 2-го этажа вагона (1-я минута пожара в крайнем купе)

**Fig. 13.** Modeling of loss of visibility at smoke of the 2<sup>nd</sup> floor of the car (the 1<sup>st</sup> minute of the fire in extreme coupe)

## Выводы

Таким образом, пожарная безопасность двухэтажных вагонов является недостаточной (особенно для пассажиров 2-го этажа), и требуется принятие эффективных мер по ее обеспечению. Эти меры должны включать в себя как моделирование (компьютерное и натурное) развития пожара в различных частях вагона для определения необходимого вре-

мени эвакуации, так и оценку расчетного времени эвакуации и формирование предложений по обеспечению безопасности пассажиров и персонала в случае пожара. Такие предложения могут предусматривать, например, увеличение числа ОАВ и оборудование дымовых люков на крыше вагона для выпуска дыма и высокотемпературных продуктов горения в целях облегчения эвакуации и спасения пассажиров со 2-го этажа.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Руководство по эксплуатации 4465.00.00.000 РЭ. Вагон пассажирский двухэтажный купейный со спальными местами. Модель 61-4465. URL: [www.tvz.ru/catalog/passenger/item\\_detail.php?ELEMENT\\_ID=190](http://www.tvz.ru/catalog/passenger/item_detail.php?ELEMENT_ID=190) (дата обращения: 10.05.2017).
2. Таранцев А. А., Иванов С. А., Наумушкина К. А. О проблеме пожарной безопасности двухэтажных вагонов // Транспорт России: проблемы и перспективы–2015 : материалы Юбилейной международной научно-практической конференции. — СПб. : Институт проблем транспорта им. Н. С. Соломенко РАН, 2015. — Т. 2. — С. 166–169.
3. Таранцев А. А., Иванов С. А., Наумушкина К. А., Столярова А. А. О проблеме моделирования опасных факторов пожара в двухэтажных пассажирских вагонах // Транспорт России: проблемы и перспективы–2016 : материалы Международной научно-практической конференции. — СПб. : Институт проблем транспорта им. Н. С. Соломенко РАН, 2016. — Т. 2. — С. 266–269.
4. Технический регламент о требованиях пожарной безопасности : Федер. закон РФ от 22.07.2008 № 123-ФЗ (ред. от 03.07.2016). URL: <http://docs.cntd.ru/document/902111644> (дата обращения: 10.05.2017).
5. Руководство по тушению пожаров на железнодорожном транспорте. — М. : УВО МПС, ВНИИЖТ, 2001. — 198 с.
6. Camillo A., Guillaume E., Rogaume T., Allard A., Didieux F. Risk analysis of fire and evacuation events in the European railway transport network // Fire Safety Journal. — 2013. — Vol. 60. — P. 25–36. DOI: 10.1016/j.firesaf.2013.04.004.
7. Ahmed F. Abdel Gawad, Muhammad N. Radhwi. Simulation of movement of fire smoke and evacuation for suburban trains: Part I, Smoke movement // Twelfth International Conference of Fluid Dynamics (ICFD 12), 19–20 December, 2016, Cairo, Egypt. — ICFD12-EG-5014. URL: [https://www.researchgate.net/publication/312128535\\_Simulation\\_of\\_Movement\\_of\\_Fire\\_Smoke\\_and\\_Evacuation\\_for\\_Suburban\\_Trains\\_Part\\_I\\_Smoke\\_Movement](https://www.researchgate.net/publication/312128535_Simulation_of_Movement_of_Fire_Smoke_and_Evacuation_for_Suburban_Trains_Part_I_Smoke_Movement) (дата обращения: 10.05.2017).
8. Muhammad N. Radhwi, Ahmed F. Abdel Gawad. Simulation of movement of fire smoke and evacuation for suburban trains: Part II, Evacuation // Twelfth International Conference of Fluid Dynamics (ICFD 12), 19–20 December, 2016, Cairo, Egypt. — ICFD12-EG-5015. URL: [https://www.researchgate.net/publication/312128446\\_Simulation\\_of\\_Movement\\_of\\_Fire\\_Smoke\\_and\\_Evacuation\\_for\\_Suburban\\_Trains\\_Part\\_II\\_Evacuation](https://www.researchgate.net/publication/312128446_Simulation_of_Movement_of_Fire_Smoke_and_Evacuation_for_Suburban_Trains_Part_II_Evacuation) (дата обращения: 10.05.2017).
9. СП 59.13330.2012. Доступность зданий и сооружений для маломобильных групп населения. — Введ. 01.01.2013. URL: <http://docs.cntd.ru/document/1200089976> (дата обращения: 10.05.2017).
10. Кошмаров Ю. А. Прогнозирование опасных факторов пожара в помещении : учебное пособие. — М. : Академия ГПС МВД России, 2000. — 118 с.
11. Батчер Е., Парнэлл А. Опасность дыма и дымозащита / Пер. с англ. — М. : Стройиздат, 1983. — 153 с.
12. Драйздейл Д. Д. Введение в динамику пожаров / Пер. с англ. — М. : Стройиздат, 1990. — 424 с.
13. Повзик Я. С. Справочник руководителя тушения пожара. — М. : ЗАО “Спецтехника”, 2004. — 361 с.
14. Верзилин М. М., Повзик Я. С. Пожарная тактика. — Изд. перераб. и доп. — М. : ЗАО “Спецтехника”, 2007. — 416 с.
15. Хемминг Р. В. Численные методы для научных работников и инженеров. — 2-е изд. / Пер. с англ. — М. : Наука, 1972. — 400 с.

**Для цитирования:** Малыгин И. Г., Таранцев А. А., Иванов С. А., Наумушкина К. А., Столярова А. А. Об обеспечении пожарной безопасности двухэтажных вагонов // Пожаровзрывобезопасность / Fire and Explosion Safety. — 2017. — Т. 26, № 7. — С. 28–38. DOI: 10.18322/PVB.2017.26.07.28-38.

## ON ENSURING THE FIRE SAFETY OF DOUBLE-DECKER RAILWAY CARS

**MALYGIN I. G.**, Doctor of Technical Sciences, Professor, Professor of Organisation of Fire Suppression and Rescue Department, Saint Petersburg University of State Fire Service of Emercom of Russia (Moskovskiy Avenue, 149, Saint Petersburg, 196105, Russian Federation); Director of Solomenko's Institute of Transport Problems of the Russian Academy of Sciences (12-ya Liniya Vasilyevskogo Ostrova, 13, Saint Petersburg, 199178, Russian Federation; e-mail: info@iptran.ru)

**TARANTSEV A. A.**, Doctor of Technical Sciences, Professor, Professor of Organisation of Fire Suppression and Rescue Department, Saint Petersburg University of State Fire Service of Emercom of Russia (Moskovskiy Avenue, 149, Saint Petersburg, 196105, Russian Federation); Head of Laboratory of Solomenko's Institute of Transport Problems of the Russian Academy of Sciences (12-ya Liniya Vasilyevskogo Ostrova, 13, Saint Petersburg, 199178, Russia; e-mail: info@iptran.ru)

**IVANOV S. A.**, Head of Laboratory, Saint Petersburg University of State Fire Service of Emercom of Russia (Moskovskiy Avenue, 149, Saint Petersburg, 196105, Russian Federation; e-mail: fuchika10@mail.ru)

**NAUMUSHKINA K. A.**, Student, Saint Petersburg University of State Fire Service of Emercom of Russia (Moskovskiy Avenue, 149, Saint Petersburg, 196105, Russian Federation; e-mail: naumushkina.ksenia@yandex.ru)

**STOLYAROVA A. A.**, Undergraduate of Institute of the Transport Equipment and Control Systems, Moscow State University of Means of Communication of the Emperor Nicholas II (Obraztsova St., 9, build. 9, Moscow, 127994, Russian Federation; e-mail: anvlst@rambler.ru)

### ABSTRACT

Double-decker railway cars have begun to be operated on the railroads of Europe since the 19<sup>th</sup> century. They were issued in two options — with seats and regiments for night rest of passengers. Double-decker cars were issued and operated in Russia and the USSR, but in limited scales. Similar cars, including high-speed are widely used still in various countries.

The current stage of development of Open joint stock company “Russian Railways” in terms of passenger traffic is characterized by the increase of their comfort and safety. In this regard, the economy class cars it is planned to replace a double-decker compartment cars of similar capacity. Taking into account the possibility of emergence of a fire, these cars are equipped with fire alarm, fire extinguishing and rescue of the passengers through the windows of the emergency exits.

However, it is necessary to simulate the development of fire effects under different scenarios of its emergence on the floor of the car. The aim of such modeling is the determination of time of blocking of evacuation ways and exits of the floors and the car in general and evaluation of the safety of passengers.

This article discusses several options for modeling the development of dangerous fire factors — using a field model, implemented by a computer program and the analytical expressions under the integral and zonal models.

According to the results of computer studies have shown that a fire in a double-decker train is the greatest danger for passengers of the second floor. This is due to the dynamics of the temperature increase at the exit to the floor, and a quick smoke. The different used models of fire development give consistent results.

In the end, the proposals to increase the safety of passengers in case of fire. Such offers can include increase in number of windows emergency exits and the equipment of hatches on a roof of the car for production of smoke and high-temperature products of burning for the purpose of simplification of evacuation and rescue of passengers from the 2<sup>nd</sup> floor.

**Keywords:** railway transport; double-decker railway car; fire safety; mathematical modeling; evacuation.

## REFERENCES

1. Operation manual 4465.00.00.000 RE. The passenger two-storeyed compartment railway car a with sleeping places. Model 61-4465 (in Russian). Available at: [www.tvz.ru/catalog/passenger/item\\_detail.php?ELEMENT\\_ID=190](http://www.tvz.ru/catalog/passenger/item_detail.php?ELEMENT_ID=190) (Accessed 10 May 2017).
2. Tarantsev A. A., Ivanov S. A., Naumushkina K. A. About problems of fire safety double-decker rail cars. In: *Transport Rossii: problemy i perspektivy–2015. Materialy Yubileynoy mezhdunarodnoy nauchno-prakticheskoy konferentsii* [Transport of Russia: Problems and Prospects–2015. Proceeding of Anniversary International Scientific and Practical Conference]. Saint Petersburg, Solomenko Institute of Transport Problems of the Russian Academy of Sciences Publ., 2015, vol. 2, pp. 166–169 (in Russian).
3. Tarantsev A. A., Ivanov S. A., Naumushkina K. A., Stolyarova A. A. On the modeling of fire effects in a two-storey passenger cars. In: *Transport Rossii: problemy i perspektivy–2016. Materialy Mezhdunarodnoy nauchno-prakticheskoy konferentsii* [Transport of Russia: Problems and Prospects–2016. Proceeding of International Scientific and Practical Conference]. Saint Petersburg, Solomenko Institute of Transport Problems of the Russian Academy of Sciences Publ., 2016, vol. 2, pp. 266–269 (in Russian).
4. *Technical regulations for fire safety requirements*. Federal Law on 22.07.2008 No. 123 (ed. 03.07.2016) (in Russian). Available at: <http://docs.cntd.ru/document/902111644> (Accessed 10 May 2017).
5. *Manual on extinguishing fires in railway transport*. Moscow, UVO MPS, VNIIZhT Publ., 2001. 198 p. (in Russian).
6. Camillo A., Guillaume E., Rogaume T., Allard A., Didieux F. Risk analysis of fire and evacuation events in the European railway transport network. *Fire Safety Journal*, 2013, vol. 60, pp. 25–36. DOI: 10.1016/j.firesaf.2013.04.004.
7. Ahmed F. Abdel Gawad, Muhammad N. Radhwi. Simulation of movement of fire smoke and evacuation for suburban trains: Part I, Smoke movement. In: *Twelfth International Conference of Fluid Dynamics (ICFD 12)*, 19–20 December, 2016, Cairo, Egypt, ICFD12-EG-5014. Available at: [https://www.researchgate.net/publication/312128535\\_Simulation\\_of\\_Movement\\_of\\_Fire\\_Smoke\\_and\\_Evacuation\\_for\\_Suburban\\_Trains\\_Part\\_I\\_Smoke\\_Movement](https://www.researchgate.net/publication/312128535_Simulation_of_Movement_of_Fire_Smoke_and_Evacuation_for_Suburban_Trains_Part_I_Smoke_Movement) (Accessed 10 May 2017).
8. Muhammad N. Radhwi, Ahmed F. Abdel Gawad. Simulation of movement of fire smoke and evacuation for suburban trains: Part II, Evacuation. In: *Twelfth International Conference of Fluid Dynamics (ICFD 12)*, 19–20 December, 2016, Cairo, Egypt, ICFD12-EG-5015. Available at: [https://www.researchgate.net/publication/312128446\\_Simulation\\_of\\_Movement\\_of\\_Fire\\_Smoke\\_and\\_Evacuation\\_for\\_Suburban\\_Trains\\_Part\\_II\\_Evacuation](https://www.researchgate.net/publication/312128446_Simulation_of_Movement_of_Fire_Smoke_and_Evacuation_for_Suburban_Trains_Part_II_Evacuation) (Accessed 10 May 2017).
9. *Set of rules 59.13330.2012. Accessibility of buildings and structures for persons with disabilities and persons with reduced mobility* (in Russian). Available at: <http://docs.cntd.ru/document/1200089976> (Accessed 10 May 2017).
10. Koshmarov Yu. A. *Prognozirovaniye opasnykh faktorov pozhara v pomeshchenii* [Forecasting of fire hazards in the case of indoor fire]. Moscow, State Fire Academy of Ministry of Interior of Russia Publ., 2000. 118 p. (in Russian).
11. Butcher E. G., Parnell A. C. *Smoke control in fire safety design*. London, E. & F. N. Spon, 1979. 178 p. (Russ. ed.: Batcher E., Parnell A. *Opasnost dyma i dymozashchita*. Moscow, Stroyizdat, 1983. 153 p.).
12. Drayzdel D. D. *An introduction to fire dynamics*. Chichester, John Wiley and Sons, 1985 (Russ. ed.: Drayzdel D. D. *Vvedeniye v dinamiku pozharov*. Moscow, Stroyizdat, 1990. 424 p.).
13. Povzik Ya. S. *Spravochnik rukovoditelya tusheniya pozhara* [Head of firefighting handbook]. Moscow, Spetstekhnika Publ., 2004. 361 p. (in Russian).
14. Verzhilin M. M., Povzik Ya. S. *Pozharnaya taktika* [Fire tactics]. Moscow, Spetstekhnika Publ., 2007. 416 p. (in Russian).
15. Hamming R. W. *Numerical methods for scientists and engineers*. York, PA, The Maple Press Company, 1962 (Russ. ed.: Hamming R. W. *Chislennyye metody dlya nauchnykh rabotnikov i inzhenerov*. 2<sup>nd</sup> ed. Moscow, Nauka Publ., 1972. 400 p.).

**For citation:** Malygin I. G., Tarantsev A. A., Ivanov S. A., Naumushkina K. A., Stolyarova A. A. On ensuring the fire safety of double-decker railway cars. *Pozharovzryvobezopasnost / Fire and Explosion Safety*, 2017, vol. 26, no. 7, pp. 28–38 (in Russian). DOI: 10.18322/PVB.2017.26.07.28-38.

**ПЕРЕВОД. ОРИГИНАЛЬНАЯ ВЕРСИЯ:**

© Peter Thompson, Daniel Nilsson, Karen Boyce, Denise McGrath. Evacuation models are running out of time. *Fire Safety Journal*, 2015, vol. 78, pp. 251–261. DOI: 10.1016/j.firesaf.2015.09.004.

**PETER THOMPSON** (Autodesk Ltd., Farnborough, UK)

**DANIEL NILSSON** (Lund University, Lund, Sweden)

**KAREN BOYCE** (Ulster University, UK)

**DENISE McGRATH** (University College Dublin, Dublin, Ireland)

*Научное редактирование:*

**В. В. ХОЛЩЕВНИКОВ**, д-р техн. наук, профессор, профессор кафедры пожарной безопасности в строительстве, Академия ГПС МЧС России (Россия, 129366, г. Москва, ул. Бориса Галушкина, 4; e-mail: reglament2004@mail.ru)

## МОДЕЛИ ДЛЯ РАСЧЕТА ЭВАКУАЦИИ ЛЮДЕЙ УСТАРЕВАЮТ

В существующих моделях эвакуации представление о движении людей, как правило, основано на данных, собранных в 1950–1980-х годах, т. е. на данных, которым более 40 лет. С 1970-х годов характеристики населения во всем мире резко изменились. Отчеты показывают, что процент пожилых людей и показатели ожирения значительно увеличились, и эта тенденция, как прогнозируется, будет продолжаться и в будущем. В недавних исследованиях [1–3] указана величина, до которой различные возрастные группы населения могут снизить общую скорость людского потока. Кроме того, хорошо зарекомендовавшие себя исследования позволили количественно оценить влияние размеров тела на скорость потока [4]. Однако многие существующие модели эвакуации не учитывают меняющихся характеристик населения. Цель настоящей работы – проанализировать существующие демографические данные и динамику потоков населения, вывести ориентировочный коэффициент изменения потока для будущих групп населения и рассмотреть последствия для компьютерных моделей и проектирования зданий в будущем.

The representation of crowd movement in existing evacuation models is typically based on data collected in the 1950s to 1980s, i. e., data that are more than 40 years old. Since the 1970s, population characteristics have changed dramatically around the world. Reports show that the percentage of elderly and obesity rates have increased significantly and this trend is predicted to continue into the future. Recent research [1–3] illustrates the magnitude by which different age cohorts of a population group can reduce the general speed and flow rates. In addition, well established studies have quantified the impact of body dimensions on speed and flow [4]. However, many existing evacuation models fail to take the changing characteristics of populations into account. This paper aims to review existing knowledge of population demographics and crowd dynamics, derive an indicative flow reduction factor for future populations, and consider the implications for computer models and building design in the future.

**Ключевые слова:** эвакуация; модель; население; толпа; передвижение; поток; безопасность; моделирование; демография; нормы в области чрезвычайных ситуаций.

**Keywords:** evacuation; model; population; crowd; walking; flow; safety; simulation; demographics; emergency standards.

### 1. Введение

Стандартные анализы безопасности жизнедеятельности в зданиях и транспортных системах используют простейший вид потока с некоторой скоростью ходьбы для расчета времени эвакуации. Действующие документы по объемно-планировочным решениям обычно применяют общую скорость потока для единой однородной массы людей, которая не изменилась с тех пор, как размеры дверей и проходов были первоначально регламентированы в се-

редине 20-го столетия. Справочные наборы данных, используемые в текущих руководящих документах, были опубликованы более 50 лет назад [4–6] и поэтому потенциально представляют собой неопределенный риск для жизни групп с различными характеристиками мобильности. В последние годы эти давно опубликованные данные и соотношения между скоростью, потоком и плотностью были поставлены под сомнение. Действительно, создатели наиболее значимой базы данных в Северной Аме-

рике (Fruin [6] и Pauls [7]) заявили, что их наборы данных больше не применимы и попросили удалить их из будущих руководств по проектированию [8].

Потеря уверенности в использовании прежних “однородных” данных объясняется признанием в нашем обществе все возрастающей доли пожилых людей, людей, страдающих ожирением, и инвалидов (United Nations [9, 10], OECD [11]). Эти пропорции значительно возросли с тех пор, как в 50–70-х годах были впервые проведены наблюдения за выходом и передвижением потоков, состоящих из офисных работников и пассажиров. Перемешивание состава потока до однородного может иметь драматический эффект для оптимального движения потока толпы и, в конечном счете, безопасного выхода. Некоторые недавние исследования содержат обзор данных и формул о потоках людей разного возраста на лестницах [12] и горизонтальных поверхностях [1–3] и указывают, что основные значения параметров потока для однородных групп “здоровые взрослые” еще не изменились существенно, но наблюдается очень значительное снижение скорости потока, состоящего преимущественно из “пожилых” людей. Недавнее исследование Национального института стандартов и технологий (NIST) показывает, что средняя скорость ходьбы пожилых людей по лестницам составляла 0,28 м/с, в то время как несколько источников [6, 13, 14] приводят значения между 0,48 и 1,7 м/с для групп “здоровых взрослых людей”, спускающихся по лестницам. Снижение скоростей и мобильности отдельных людей будет оказывать косвенное влияние на скорость потока. Мы знаем, что следующие параметры влияют на индивидуальную скорость ходьбы, но не учитываются при анализе потока толпы:

- изменения в зависимости от возраста (Организация Объединенных Наций (ООН) [9], Ando с соавт. [15]);
- физические габариты населения — избыточный вес и возрастание ожирения (OECD [11]);
- наличие инвалидности (Воусе с соавт. [16]).

Предписывающие указания и руководства по проектированию [17–23] используют один общий стандарт удельной пропускной способности потока (обычно 80 чел./метр ширины·мин), а иногда больше для стадионов), и даже современные имитационные компьютерные модели применяют эти унифицированные параметры для всего населения. Гомогенные обобщения населения теряют достоверность с увеличением количества различий в возможностях людей. Утверждения некоторых авторов, что существующие подходы моделирования “работают вне времени”, приводят к тому, что основные математические описания остаются прежними, тогда как демография населения продолжает меняться. Новые

подходы, учитывающие соответствующие новые данные, необходимы для того, чтобы рассмотреть последствия для безопасности жизни сейчас и в будущем.

Учитывая изменения характеристик посетителей зданий, т. е. увеличение возраста (приводящее к возрастанию инвалидности [24], снижению скорости ходьбы и расширению использования вспомогательных средств передвижения) и растущие темпы ожирения (вызывающего снижение скорости ходьбы и уменьшение количества людей, размещающихся на единице площади), необходимо пересмотреть представление движения многолюдных потоков в моделях эвакуации.

Цель представленной статьи — сделать важный шаг в этом направлении путем:

- 1) обсуждения тенденций изменения демографии населения за 80-летний период;
- 2) обсуждения возрастающей изощренности аналитических описаний эвакуационных моделей, использующих, тем не менее, простейшие математические закономерности;
- 3) введения некоторых первичных математических упрощений для отображения демографических изменений;
- 4) обсуждения возможного пути дальнейшего изучения многолюдных потоков, учитывающего биометрию и взаимодействие людей.

## 2. Расчет эвакуации: начальным исследованиям потока толпы более 40 лет

Большинство расчетов при анализе эвакуации еще базируется на удельной пропускной способности потока, т. е. величине, с которой население будет “течь” через элементы путей эвакуации (коридор, дверной проем или лестница), выраженной в количестве человек на единицу ширины в единицу времени. Наше нынешнее понимание движения пешеходов в населенных местах основано на относительно старых данных о движении в основном трудоспособных людей. Наиболее существенные данные, использованные при анализе движения и эвакуации людей [4–7, 15, 25], получены из исследований, проведенных в период между 1950-ми и 1980-ми годами (табл. 1). Эти совокупности данных получены на основе наблюдений за движением здоровых пассажиров (Hankin и Wright [5], Fruin [6], Ando с соавт. [15]), пешеходов при обычном (спокойном) движении в различных типах зданий (Предтеченский и Милинский [4]) или в зданиях во время тренировок по эвакуации (Pauls [7], Предтеченский и Милинский [4]). Эти ранние исследования сформировали основы нашего понимания явления “поток людей” и составили основу документов по проектированию

**Таблица 1.** Итоги истории исследований удельной пропускной способности людского потока

| Год  | Авторы                                 | Максимальная расчетная удельная пропускная способность, чел./((м·с) | Предельная удельная пропускная способность, чел./((м·с) | Область данных/исследований                                                          |
|------|----------------------------------------|---------------------------------------------------------------------|---------------------------------------------------------|--------------------------------------------------------------------------------------|
| 1958 | Hankin и Wright [5]                    | 1,48                                                                | 1,92                                                    | При обычных условиях                                                                 |
| 1969 | Предтеченский и Милинский [4]          | 1,70                                                                | 2,06                                                    | Максимальные потоки при высокой плотности для взрослых в летней одежде               |
| 1972 | Отчет SCICON [20]                      | 1,37                                                                |                                                         | Данные по потокам футбольных болельщиков                                             |
| 1973 | Guide to Safety at Sports Grounds [17] | 1,82 (метод ширины выхода)                                          |                                                         | Исходя из японских данных, полученных из расчета ширины выхода 1,0 чел./((0,55 м·с)  |
| 1971 | Fruin [6]                              | 1,37                                                                | 4,37                                                    | Поток окончательно регламентирован, “привязан” к потокам солдат, находящихся в давке |
| 1983 | Polus с соавт. [26]                    | 1,25–1,58                                                           | 1,56                                                    | Данные, собранные в Израиле, по потокам на тротуарах                                 |
| 1988 | Ando с соавт. [15]                     |                                                                     | 1,7–1,8                                                 | Пассажиры в нормальных условиях                                                      |

во всем мире, например Green Guide (Home Office [17]), SFPE Handbook of Fire Engineering (Nelson и MacLennan [18]), PD 7974-6 (BSI [19]).

Некоторые выборки данных по удельной пропускной способности, полученные во второй половине 20-го столетия, указаны в табл. 1. Общепринятое значение, которое лежит в основе существующих руководящих документов Великобритании (утвержденный документ В [21]), США (NFPA 101: Life Safety Code [22]), а также Международной морской организации (ИМО [23]), составляет 80 чел./((м·мин), или 1,33 чел./((м·с). Величина удельной пропускной способности мало изменилась с 70-х годов. Например, в более ранних версиях стандартов США и Великобритании с 70-х годов использовалась единица измерения ширины 40 чел./((21 дюйм·мин), что эквивалентно 74,99 чел./((м·мин). Фактически стандартизированные нормы удельной пропускной способности, как основы расчета, немного увеличились в последних документах, но не по очевидной научной причине, а скорее по целесообразности применения единых значений.

Сомнения, возникающие в отношении некоторых исходных данных [6, 27], привели к сбору более свежих данных и к новым исследованиям. Например, исследование NIST [12] рассматривает совокупности данных о перемещении по лестницам пожилых людей, людей с ограниченными возможностями и офисных служащих с анализом их движения при выходе на лестничные марши. В нем освещаются значительные различия в скоростях ходьбы пожилых людей. Однако в настоящее время не планируется пересмотр или изменение “стандартных” скоростей движения потоков, принятых в текущих руководствах, в то время как демографические характеристики населения продолжают меняться. Такие термины, как “эпидемия ожирения” и “старе-

ющее общество”, становятся все более распространенными. Известно, что такие факторы, как возраст и физические характеристики (например, габариты тела и т. д.), влияют на индивидуальную скорость движения. Однако из-за отсутствия специального научного анализа эффектов их влияния на групповое движение (т. е. “людской поток”) не следует ожидать каких-либо изменений в основных компьютерных “поточных” моделях, определяющих стандартные способы описания эвакуации, сейчас или в следующие 40 лет.

### 3. Фундаментальная природа “потока”

Основное уравнение “потока” толпы выражается формулой (1), приведенной ниже:

$$q = vd, \quad (1)$$

где  $q$  — поток на единицу ширины, чел./((м·с);

$v$  — скорость, м/с;

$d$  — плотность, чел./м<sup>2</sup>.

Мы не должны забывать, что модель “многолюдного потока” как физическая модель есть выражение количества человек, проходящих через пространственную единицу (в эвакуационной системе) в единицу времени. Если параметры изменяются, влияя на скорость людского потока (скорость ходьбы) или плотность (концентрация и размер), то неизбежны физические взаимодействия между людьми в потоке. Важно рассмотреть основную физику этого явления, поскольку мы рассматриваем значимость сложных демографических изменений и физических взаимодействий.

### 4. Анализ эвакуации: использование понятий “поток” и “время”

Главная цель расчетов при обеспечении безопасности жизни (включая анализ эвакуации) со-

стоит в том, чтобы обеспечить для посетителей возможность покинуть здание до того, как условия их пребывания станут невыносимыми и появится явный риск для их жизни. Основная идея заключается в том, что время, имеющееся у эвакуирующихся для достижения безопасной зоны (требуемое безопасное время выхода — RSET (Required Safe Escape Time)), должно быть меньше ожидаемого времени образования небезопасных для них условий (доступное безопасное время — ASET (Available Safe Escape Time)). Расчет ASET против RSET (BSI [19]) хорошо обоснован и широко используется среди сообществ пожарной безопасности.

Самой ранней оценкой времени (ASET) было значение 2,5 мин, полученное при реальной эвакуации театра “Эмпайр” в Эдинбурге в 1911 году. В этом инциденте предупреждение о пожаре поступило перед началом исполнения государственного гимна. Театр был эвакуирован примерно за время исполнения гимна (пока оркестр продолжал играть), хотя не обошлось без жертв. Важно отметить, что до сих пор этот показатель (150 с) используется в нормативных документах Великобритании [21] в качестве контрольного времени эвакуации людского потока. Такая длительность в сочетании с предполагаемой пропускной способностью потока 1,33 чел./м·с (80 чел./м·мин)) приводит к наиболее часто используемой норме ширины выхода на человека (5 мм/чел.), которая применяется для расчета пропускной способности выхода в соответствии с руководством по проектированию (уравнение (2)):

$$q = \frac{N_p \text{ (people)}}{w \text{ (metres)} \cdot t \text{ (sec.)}} \therefore \frac{N_p}{w} = qt = 80/60 \cdot 150 = 200$$

$$\therefore \frac{w}{N_p} = \frac{1}{200} = 0,005, \quad (2)$$

где  $q$  — поток на единицу ширины, чел./м·с;

$N_p$  — количество человек;

$w$  — ширина выхода, м;

$t$  — общее время, с.

Таким образом, ширина для “безопасного” выхода в расчете на одного человека = 0,005 м (5 мм).

Это “стандартное” число ширины выхода 5 мм на человека, позволяющее “безопасно” эвакуироваться, используется в строительных нормах Великобритании [21] и США [22], однако оно подходит лишь для однородного, стандартного потока (понятие из середины 20-го столетия), способного уложиться во время исполнения национального гимна Великобритании. Очевидно, что оба нормируемых значения: 2,5 мин и 80 чел./м·мин — могут быть оспорены относительно применимости для любого вида использования здания.

В наше время возможности изменения этих значений состоят в том, что большинство современных правил теперь позволяет применять более совершенные подходы, основанные на характеристиках, при которых достаточная научная строгость может быть продемонстрирована органу, обладающему юрисдикцией для утверждения проектного решения здания. Исполнительная база проектирования может включать в себя использование простых ручных вычислений или более сложное компьютерное моделирование. Простые ручные вычисления зависят от надежных предположений о скорости и потоке (часто необходимо принимать во внимание плотность), которые должны быть такими же надежными, как и исходные данные. Компьютерное моделирование, стремительно развивающееся в последние десятилетия, также зависит от исходных данных. Если исходные данные или параметры движения для модели являются несовершенными или устаревшими, то это оказывает реальное влияние на достоверность результатов, а отсюда и уверенность, с которой результаты могут быть использованы для оценки безопасности жизнедеятельности.

## 5. Демографические тенденции народонаселения

Стандартные описания потока и зависимости, которые используются сегодня при проектировании, были получены достаточно давно, исходя из данных, относящихся в основном к физически здоровым офисным или пригородным группам населения, в период между 1950-ми и 1970-ми годами (некоторые из них представлены в табл. 1). С тех пор доступность зданий для людей с инвалидностью значительно изменилась, как и демография населения во всем мире. В большинстве регионов доля пожилых людей стала намного выше, и прогнозируется, что она станет еще более значимой к 2050 году (ООН). Кроме того, предполагается, что доля людей с избыточным весом и ожирением среди взрослого населения продолжит значительно увеличиваться (OECD [11]).

### 5.1. “Стареющее общество”

Прогнозируемые различия в доле пожилых людей в обществе в разных регионах мира как сейчас, так и в будущем, проиллюстрированные на рис. 1, отмечены в многочисленных источниках [9, 28]. Существует несколько причин столь значительного изменения демографических показателей населения:

1. Поколение “бэби-бум” стареет: более высокий уровень рождаемости в 1960-е годы определил в определенной степени “всплеск” численности населения [29]. Например, современный уровень рождаемости в США (в расчете на одну мать) снизился почти вдвое по сравнению с 1960 годом.

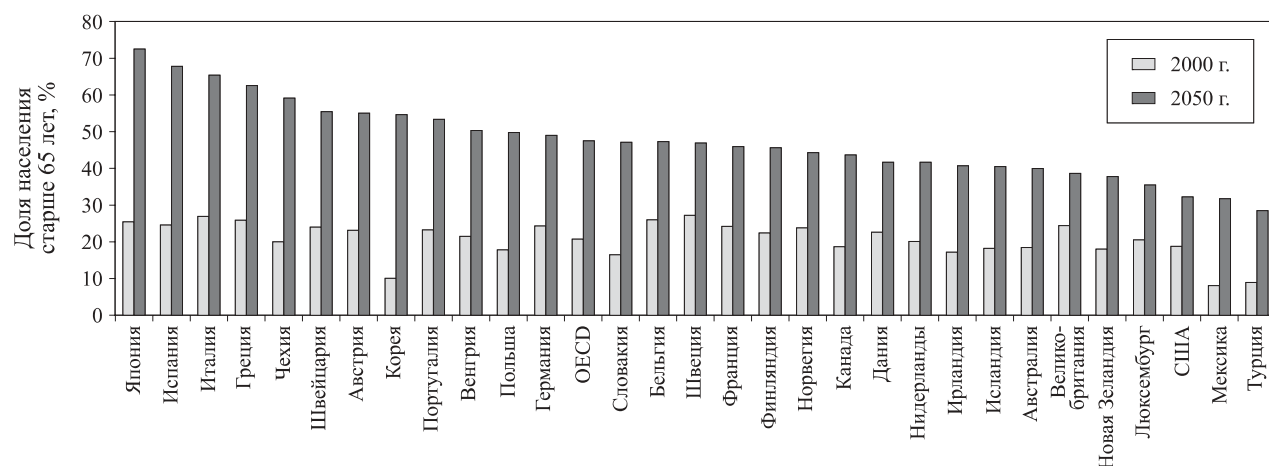


Рис. 1. Доля населения старше 65 лет (%) среди всего населения сейчас и в будущем [28]

2. Люди стали жить дольше (медицинская наука, диета); продолжительность жизни в США за последние 40 лет выросла с 70 почти до 80 лет [30].

3. У матерей появляются дети в более зрелом возрасте [31], что влияет на временное увеличение пропорций “старения” общества.

Тенденции в области народонаселения создают значительные статистические изменения в странах OECD (см. рис. 1). Предполагается, что средняя доля “пожилых людей” среди взрослого населения увеличится с 20 почти до 50 % к 2050 году; некоторыми странами (Япония, Испания, Италия) прогнозируется, что среди взрослого населения значительное большинство будут составлять люди старше 65 лет. Следует отметить, что эти люди старше 65 лет могут оказаться более здоровыми, чем в предыдущих поколениях, что может повлиять на параметры многолюдных потоков, однако степень этого влияния неясна.

Уровень прогнозируемых демографических изменений будет оказывать значительное влияние на общество каждой отдельной страны, как и мира в целом. Правительства тщательно рассматривают финансовые последствия, а также последствия для служб экстренной помощи [32] и разрабатывают меры, направленные на их преодоление. Важно, чтобы проектирование зданий, данные и методы, которые мы используем для инженерных анализов, были также адаптированы к происходящим изменениям в нашем обществе.

## 5.2. Увеличение размеров тела и “эпидемия ожирения”

В большинстве стран мира темпы роста ожирения и “избыточной массы тела” населения неуклонно увеличивались в течение нескольких поколений, и, в итоге, за последние 25 лет эти изменения стали более быстрыми и очевидными (OECD [11]) (рис. 2). Системы здравоохранения планируют для приема более крупных и тучных людей изменить размеры

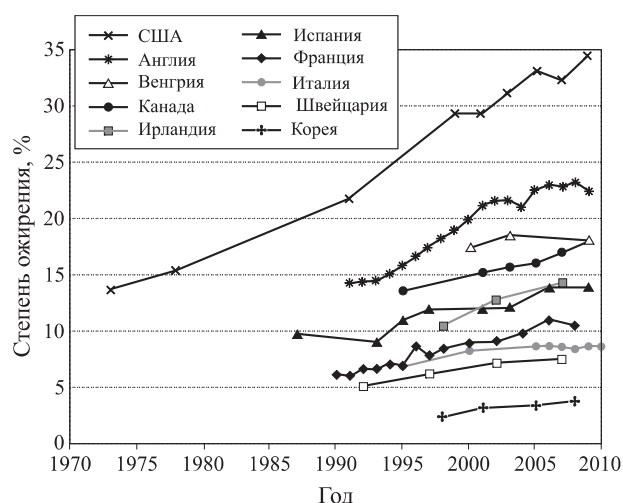


Рис. 2. Показатели степени ожирения взрослых людей во многих странах через 40 лет [28]

кроватей, а также оборудование для подъема пациента в машинах скорой помощи [36]. Эти тенденции отчетливо фиксируются документально и обусловлены сочетанием доступности потребления большего количества калорий на душу населения с сопутствующей статистической тенденцией уменьшения физических нагрузок в повседневной жизни людей [37].

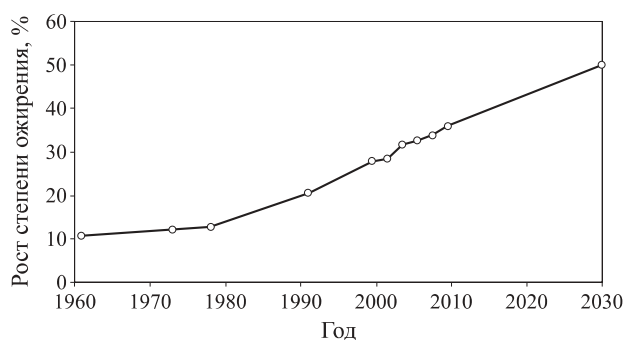


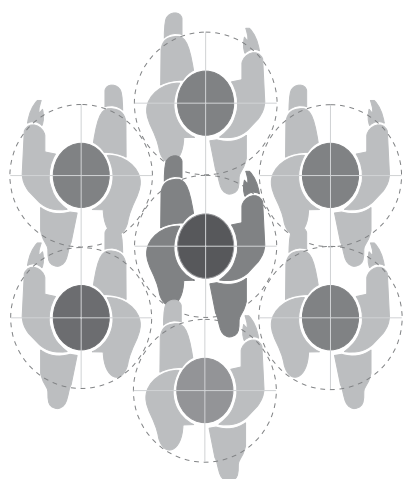
Рис. 3. Рост числа людей, страдающих ожирением, среди населения от 20 до 74 лет в США в 1960–2030 гг. [39]

Кроме того, растет детское ожирение [38], что указывает на неизбежное продолжение наблюдаемых тенденций в будущем. Если мы посмотрим на прогнозируемую тенденцию для США (рис. 3), то к 2030 году ожирение у взрослых должно возрасти до 50 % (Levy с соавт. [39]).

## 6. Влияние демографии на скорость и поток

Толпы состоят из людей в умеренно заполненном или переполненном пространстве, и это важно для понимания последствий того, что менее подвижные, маломобильные или тучные люди могут участвовать в движении общего потока: ограничен-

Радиус “зоны с касанием” 12”  
(площадь передвижения 3 ft<sup>2</sup>)



Радиус “зоны без касания” 18”  
(площадь передвижения 7 ft<sup>2</sup>)

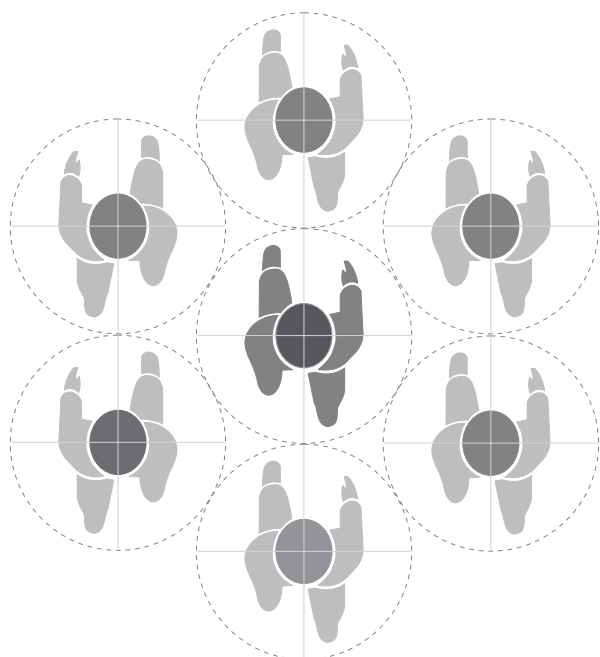


Рис. 4. Зона “с касанием” и “зона без касания” по Fruin [6]

ное пространство лимитирует для его участников возможность обгона, поэтому менее мобильные люди начинают диктовать скорость и характеристики потока. Предполагается, что даже незначительное количество медленно идущих индивидуумов может оказать определяющее влияние на характеристики всего потока. Так, при предполагаемой плотности потока от 3 до 4 чел./м<sup>2</sup> (показанной в серии иллюстраций на рис. 4, согласно Fruin [6], между зонами с “касанием” и “зонами без касания”) обгон невозможен, так как медленно идущие участники людского потока будут определять скорость движения этой группы людей и, следовательно, скорость всего потока. Кроме того, для таких участков эвакуационного пути, как дверные проемы и лестницы, маломобильные и, возможно, более тучные люди начнут диктовать скорость движения и всего потока, потому что они так проходят через участки ограниченной ширины.

Возрастающее количество пожилых людей и людей, страдающих ожирением, достигает такой величины, что они будут иметь определяющее влияние на мобильность и антропометрические характеристики населения, а затем и на параметры движения людского потока.

### 6.1. Влияние возраста на скорость движения потока

Возраст напрямую связан с ухудшением физических, умственных и неврологических функций (Reeves с соавт. [33], Kang и Dingwell [34]), которые отрицательно влияют на индивидуальное движение, например на скорость и длину шага. Иллюстрационная диаграмма Ando с соавт. [15], приведенная на рис. 5, показывает, что “пожилые люди” (старше 65 лет) передвигаются примерно на 20–25 % медленнее, чем взрослые в возрасте 18–40 лет. Другим исследованием Fujiyama и Tyler [35] фиксируется, что люди в возрасте 60–84 лет спускаются по лестнице при свободном движении со скоростью от 0,60 до 1,11 м/с в зависимости от геометрии и уклона лест-

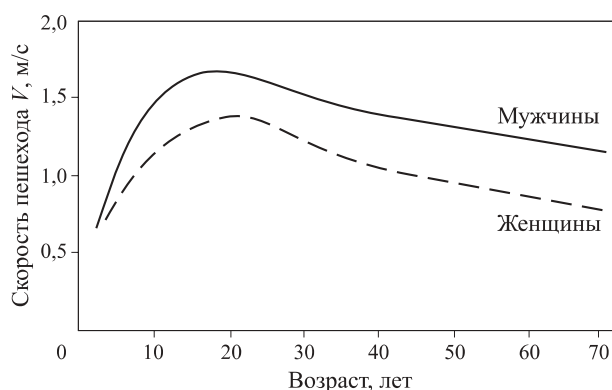


Рис. 5. Связь между скоростью и возрастом при движении по горизонтальному участку пути (Ando [15])

ницы, что намного ниже, чем типичные скорости беспрепятственного спуска, достигаемые более молодыми людьми. Последующее исследование NIST [12] показывает, что скорость, с которой пожилые люди спускаются по лестнице (с чужой помощью или без нее), может быть намного ниже (на 50 %) по сравнению со здоровыми взрослыми людьми.

Если прогнозы отчетов OECD [11] верны, то в будущем доля “пожилых людей” в некоторых странах превзойдет остальную часть взрослого населения. Из этого следует, что средняя скорость ходьбы населения будет уменьшаться, поэтому важно понять, какое влияние это может оказать на параметры потока в разных ситуациях.

Если мы рассмотрим статистические данные, приведенные на рис. 1–5, то возможно снижение скорости и характеристик потока для групп со значительным меньшинством пожилых или ослабленных людей на 20–25 %, поскольку более молодые участники потока теперь, при таких высоких плотностях, естественно, уже не могут их обгонять. Этот эффект станет, вероятно, больше, когда в потоке будут “доминировать” менее подвижные люди, а также в том случае, когда рассматривается скорость передвижения пожилых людей (с чужой помощью и без нее), как в исследовании NIST [12], на 50 % ниже, чем скорость здоровых взрослых людей.

Недавние исследования Холщевников и др. [1–3] имеют явную количественную оценку эффекта влияния демографии населения на скорость и интенсивность движения людского потока (рис. 6 и 7). Эти исследования при сопоставлении данных предыдущих им исследований с более новыми данными дают очень полезный анализ выявленных тенденций и влияния их последствий на движение всего людского потока по горизонтальным путям.

Три типа популяции, включенные в исследование (а именно взрослые, дети и пожилые люди), разумно полагать, имеют разные возрастные и габаритные характеристики, но мы оперируем средними значениями, указанными в результатах этих исследований. При построении графиков на рис. 6 и 7 нами были использованы значения скорости свободного движения в интервале между “спокойным” и “активным” движением взрослых и детей дошкольного возраста. Порог спокойный/активный был применен потому, что эти значения соответствуют нижним значениям неторопливой ходьбы, указанным в других источниках [6, 15] для нормальных условий движения, и оказались бы непропорционально более низкими, если бы мы использовали средние значения из интервала “спокойного” движения. Для пожилых людей доступны только скорости “спокойного” движения. Таким образом, скорости беспрепятственной ходьбы, используемые в

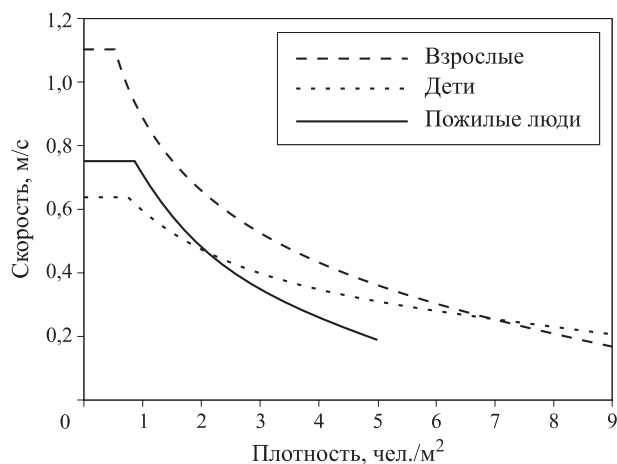


Рис. 6. Зависимость скорости движения людского потока от плотности для различных возрастных групп по данным Холщевникова [1–3]

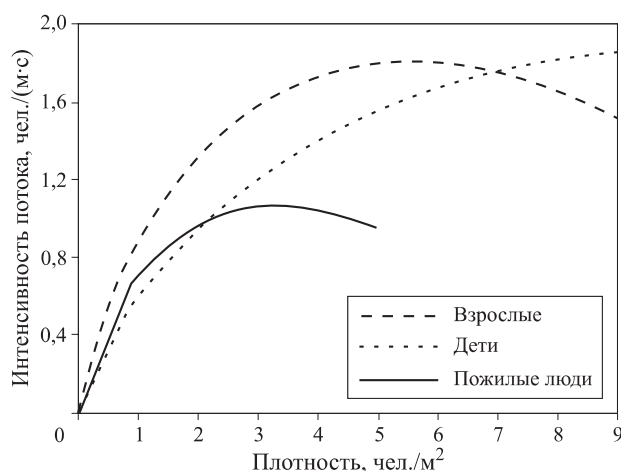


Рис. 7. Зависимость интенсивности движения людского потока от плотности для различных возрастных групп по данным Холщевникова [1–3]

этих формулах, составляли: 1,1 м/с для взрослых, 0,63 м/с для пожилых людей и 0,75 м/с для детей дошкольного возраста.

Наибольшая пропускная способность потока, состоящего из пожилых людей (1,06 чел./(м·с) (см. рис. 7), на 41 % меньше, чем пропускная способность потока здоровых взрослых людей (1,80 чел./(м·с)). Кроме того, этот пик “пожилого” потока на 20 % меньше, чем типичное расчетное значение 1,33 чел./(м·с) (80 чел./(м·мин)), обсуждаемое в разделе “Введение”. Интересно, что, несмотря на то что дети дошкольного возраста имеют более низкую скорость свободного движения, они обеспечивают более высокую пропускную способность потока, поскольку имеют гораздо меньшие размеры тела и, как правило, находятся в хорошей физической форме и здоровы. Таким образом, потоки населения со значительной долей пожилых людей будут иметь пропускную способность на 20 % ниже, чем это предполагается.

## 6.2. Влияние размеров тела на скорость и величину людского потока

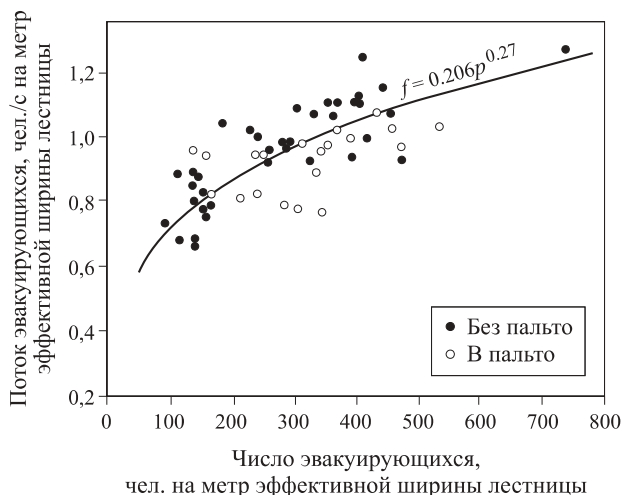
Влияние значительно более тучных людей, страдающих ожирением, пока еще не учитывается должным образом применительно к движению людского потока, однако результаты одного исследования, проведенного Spearpoint и Maclellan [40], показали, что *“...общее время эвакуации будет увеличиваться по мере старения населения и роста тучности жителей. Эти увеличения могут быть от 5–8 % при сравнении сценариев 2006 и 2031 гг. в Новой Зеландии до 20 % при сравнении канадского сценария 1971 г. и новозеландского сценария 2031 года...”*. Предполагаемое увеличение времени эвакуации до 20 % в течение 60 лет указывает на высокую степень потенциального влияния ожирения на людской поток.

Если мы обратимся к основному уравнению потока (1), где поток рассматривается как складывающийся из скорости и плотности, то мы могли бы начать понимать значение увеличения пространства, занимаемого каждым человеком, и его влияние на измеряемую плотность людского потока. Если мы рассмотрим результаты исследований Паулса, наблюдавшего движение потока людей в пальто и без него [7], то они могут считаться схожими (с точки зрения пространственного анализа) с сопоставлением движения людей с избыточным весом и стройных людей (однако вполне понятны связанные с этим дополнительные вопросы идентичности эффекта, определяемой физическим состоянием, свободой передвижения, вторичными болезнями, колебаниями тела и т. д.).

Это сравнение показало, что имеется 10–20 %-ное сокращение пропускной способности потока людей в пальто по сравнению с потоком людей без пальто. Рис. 8 содержит ограниченное число точек, тем не менее он позволяет определить разницу между средним потоком эвакуирующихся (количество человек в секунду на метр эффективной ширины лестницы) и потоком эвакуирующихся в пальто. В интервале 200–450 чел., эвакуирующихся через 1 м эффективной ширины, эвакуационный поток, состоящий из людей в пальто, был меньше, чем соответствующий поток людей без пальто.

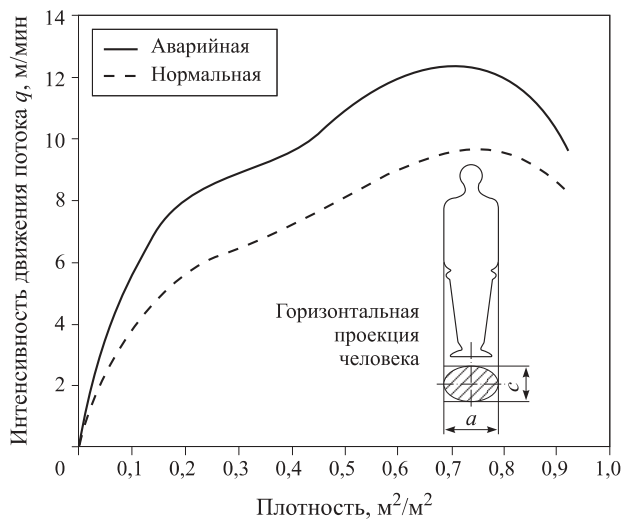
Следует добавить, что ожирение может изменить не только размеры тела, но потенциально и другие характеристики движения, например колебания тела, скорость движения и т. д. Однако в настоящее время сложно оценить влияние этих взаимосвязанных параметров движения.

Предтеченский и Милинский [4] также рассматривали эффект этого влияния на поток, связанный с устанавливаемыми размерами тела (включая зимнюю одежду), базируясь на 5000 измерениях. Они также рассматривали противоположный эффект



**Рис. 8.** Показатель Паулса потока людей в пальто и без него по данным [7] (Эффективная ширина — ширина потока, определенная по габаритам тела человека без учета его раскачивания при ходьбе. Эта величина идентична ширине эллипса горизонтальной проекции тела человека  $f$ , используемой в России после выхода диссертационной работы Милинского А. И. (1953). За рубежом использование этой величины настоятельно рекомендует Pauls J. L. — Прим. науч. редактора)

из-за меньших размеров тела (детей). Для того чтобы учесть в расчетах размер людей, эти российские исследователи выражали плотность в  $\text{м}^2$  занимаемой человеком площади, отнесенной к площади ( $\text{м}^2$ ) свободного пространства, как показано на рис. 9, поэтому интенсивность движения также выражалась в соответствующих единицах, т. е. в  $\text{м/мин}$ . Предтеченский и Милинский определяли «площадь горизонтальной проекции» человека как  $0,1 \text{ м}^2$  для взрослых людей в летней одежде и  $0,125 \text{ м}^2$  — в зимней одежде. Следовательно, если мы хотим оценивать поток в  $\text{чел./}(\text{м} \cdot \text{с})$ , то можно прийти к заключению, что увеличение размера тела за счет пе-



**Рис. 9.** Зависимость интенсивности движения людского потока для аварийных/нормальных условий от его плотности и площадь, занимаемая одним человеком [4]

перехода от летней одежды к зимней может привести к 25 %-ному снижению пропускной способности из-за больших габаритных размеров людей в зимней одежде. Следует, однако, отметить, что основным ограничением этого подхода является то, что, хотя размер тела в какой-то мере и учитывается, но не принимается в расчет длина шага и другие особенности пешеходного движения.

Показатели Паулса [7], Предтеченского и Милинского [4], рассматривавших различия между летней и зимней одеждой, являются единственными показателями, которые у нас есть и которые иллюстрируют потенциальное влияние увеличения размеров тела на поток. Фактически, Паулс поставил под сомнение обоснованность и применимость некоторых своих собственных данных (Pauls с соавт. [8]) из-за изменения численности населения и возрастающего увеличения степени ожирения. При попытке количественно оценить влияние ожирения населения прежде, чем ограниченное влияние перехода от летней к зимней одежде, в первом приближении мы должны использовать показатель 25 %-ного снижения пропускной способности потока из российских исследований. Ясно, что этот вопрос подлежит дальнейшему изучению, но сейчас важнее выбрать эмпирически определенное значение, чем совсем ничего не иметь.

Абсолютное влияние различных размеров тела на поток трудно оценить количественно, поскольку динамика движения достаточно сложна. Было показано, что ожирение коррелирует со снижением скорости движения (Hulens с соавт. [41]) и увеличением раскачивания тела при ходьбе (He и Baker [42]) и оба эти параметра, несомненно, являются важными, связанными с индивидуальным движением в населенных местах. Поэтому трудно полностью понять влияние размера тела как такового на динамику потока, поскольку невозможно раздельно определить влияние большего размера тела и снижения скорости на динамику потока без дальнейшего исследования. Другие исследования с участием детей, т. е. с малыми размерами тел по сравнению со взрослыми, привели к отношениям скорости потока/плотности, которые показывают более высокие скорости при одинаковых плотностях потоков по сравнению со стандартной кривой для взрослого населения (например, как предложено в справочнике “Руководство инженеров пожарной охраны” [43] и показано Холщевниковым с соавторами [1]). Тем не менее демографические характеристики детей включают в себя не только различные размеры тела, но и более высокую скорость ходьбы (иногда бега), что увеличивает скорость потока при более высоких плотностях. Демографические описания являются хорошим примером совместного воздействия изменений размеров тела и скорости и обеспечи-

вают успешное сравнение динамики смешанных групп населения.

## 7. Анализ эвакуации: “эволюция” компьютерных моделей

С течением времени сложность имитационных моделей, используемых для анализа эвакуации, прогрессировала. В литературе имеется ряд подробных обзоров имитационных моделей и их характеристик (Kuligowski и Peacock [43], Gwynne и Galea [44]). Подходы к моделированию приняли три хронологические формы:

1. *Поток в сети (или сети “узлов”)*, где каждое помещение или пространственный “узел” в здании имеет определенную численность людей и каждый узел соединен с проходом или дверным проемом максимальной пропускной способности. Эти модели впервые появились в 1980-х годах и были усовершенствованы в целях комплексности и возможностей их применения в период с 1980-х по 1990-е годы (BFIRES (Stahl [45]), EVACNET+ (Kisko и Francis [46]), EXIT89 (Fahy, [47]) и т. д.).

2. *Сетчатые модели*, где пространство здания подразделяется на модульные ячейки — “сито”, состоящее из элементов, соответствующих приблизительно площади тела человека (около  $0,5 \times 0,5$  м<sup>2</sup>). Движение происходит по основе, разделенной на “шаговые камни” (ячейки), каждый из которых имитирует перемещение человека из одной ячейки в другую. Эти модели впервые появились в 1990-е годы и продолжают развиваться и использоваться сегодня в более изощренных формах, например Egress (Ketchell и Cole [48]), building EXODUS (Galea и др. [49]), STEPS (Mott McDonald [50]) и т. д.

3. *Непрерывные модели*, где перемещение посетителей по пространству здания не ограничивается сеткой простой формы, а заменяется “непрерывным” движением через геометрические элементы здания; при этом “векторы движения” изображают перемещения посетителей через декартовы координаты модели. Эти модели возникли в конце 1990-х годов; при этом большинство новых моделей использует разные математические подходы для представления “непрерывности” моделируемого движения (Pedgo [51], Legion [54], Simulex [55], PathFinder [56], MassMotion [58] и FDS+Evac [59]). Следует отметить, что, хотя в этих “непрерывных моделях” существует широкий диапазон подходов к вычислению, большинство алгоритмов движения основано на локализованных оценках скорости или величины потока в зависимости от плотности, полученных в результате исследований, опубликованных в 1960–1970-е годы.

Пакеты моделирования эвакуации имеют тенденцию использовать соотношения скорость/плотность

или соотношения между плотностями потока, полученные в работах, опубликованных такими исследователями, как Hankin и Wright [5] и Togawa [60] в 1950-е годы, Предтеченский и Милинский [4] — в 1960-е, Pauls [61] и Fruin [6] — в 1970-е и Ando [15] — в 1980-е годы. По сути, концепция “постоянного потока на участке” по-прежнему составляет основу подходов к моделированию (сетка и непрерывность), хотя в ряде случаев скорость потока меняется с изменением плотности стандартного “людского потока” на более мелких единицах площади.

Почти все алгоритмы движения в этих трех “поколениях” компьютерных моделей предполагают одинаковые параметры людей в потоке, за исключением моделей пространственной близости (например, Simulex [52] и Legion [54]) и моделей “социальных сил” (например, PedGo [57] и FDS Evac [59]), которые имеют постоянную возможность вносить изменения в соответствии с поступающим потоком данных. Следует также отметить, что современные пакеты компьютерного моделирования могут демонстрировать очень впечатляющие 3D-визуальные репрезентации выхода или быстрого движения. Таким образом, пользователь может приобрести более совершенные алгоритмы движения и способы вычисления данных, чем применяются сейчас на практике.

## 8. Детальный анализ движения

Важно отметить основные отличия этих имитационных моделей, кроме фиксированных скоростей потока. В “сетчатых моделях” и во многих “непрерывных моделях” используется соотношение между скоростью и плотностью людского потока (рис. 10) или между удельной пропускной способностью людского потока и его плотностью (рис. 11).

Модели же пространственной близости в отличие от перечисленных моделей используют взаимосвязь расстояния между людьми и скорости. На рис. 12 показано, как аппроксимирующее “циркульное” пространство (рассматриваемое Fruin [6] в уплотненных группах потока) может быть использовано для математического (и геометрического) получения средних линейных расстояний между людьми при заданных плотностях. Эти расстояния применяются затем для получения кривых скорости/расстояния, показанных на рис. 13.

Непрерывные модели могут использовать эти типы отношений между скоростью и межличностным расстоянием, и одним из примеров такой модели является Simulex [22]. В Simulex каждому человеку при моделировании назначается определенная скорость свободного движения (с учетом возраста, пола и других его особенностей). Связь между скоростью ходьбы и расстоянием между людьми масштабируется таким образом, чтобы скорость свобод-

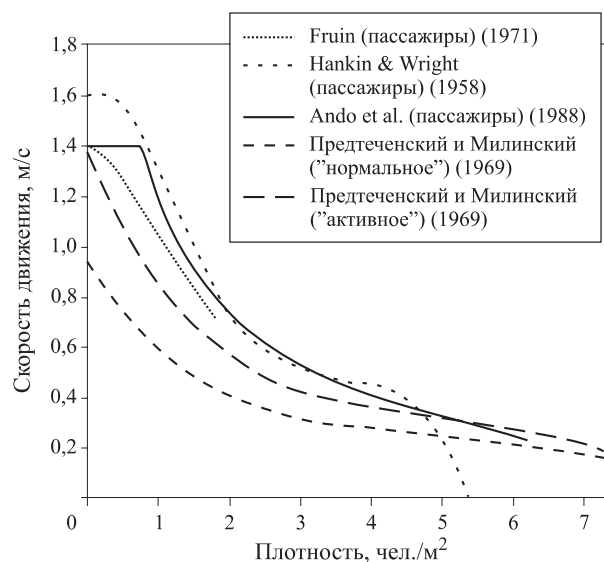


Рис. 10. Зависимость скорости людского потока от плотности (Thompson [55])

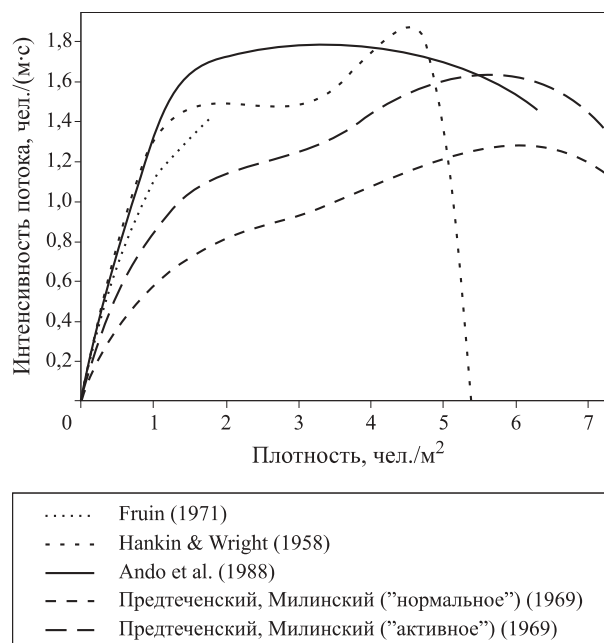
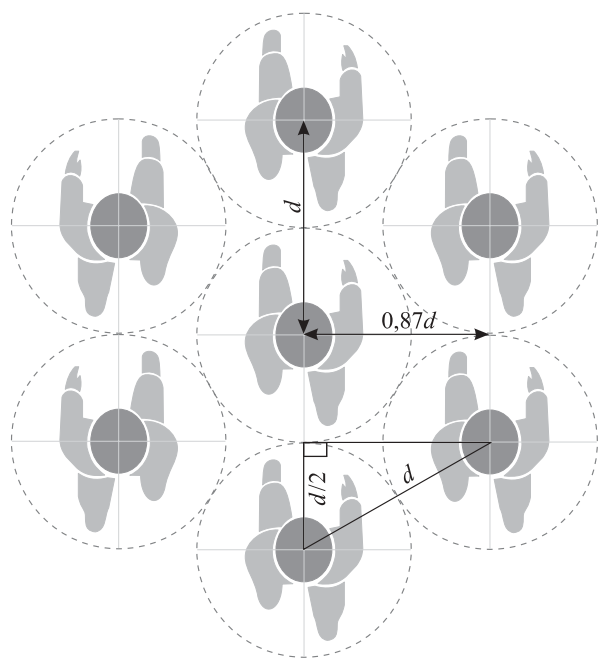


Рис. 11. Зависимость интенсивности людского потока от плотности (Thompson [55])

ного движения достигалась на таком пороговом расстоянии, при котором положение каждого человека не оказывает количественного влияния на идущих за ним людей. Реализация такого подхода Simulex проиллюстрирована на рис. 14. Когда это соотношение рассматривается как плотность, описывающие уравнения, приведенные на рис. 12, дают зависимости скорости/плотности, очень близкие описанным Ando с соавт. [15] и показанные на рис. 10. Этот подход был проверен при сопоставлении с данными, полученными из видео на четырех разных сайтах в Эдинбурге в 1994 году [55].



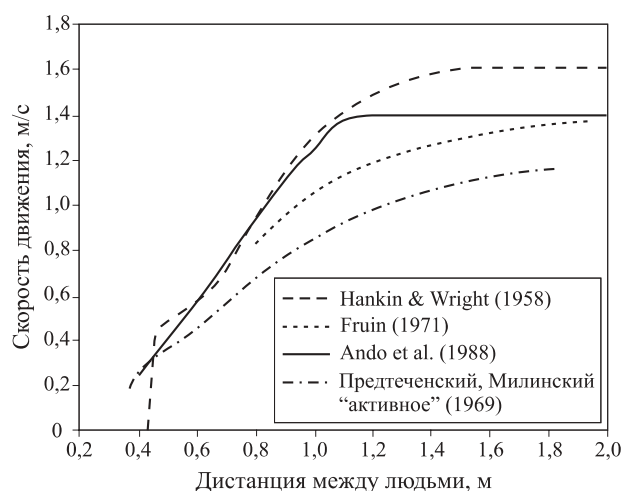
$$\text{Боковой интервал} = \sqrt{d^2 - \left(\frac{d}{2}\right)^2} = d\sqrt{\frac{3}{4}} = 0,866d$$

$$\text{Площадь на одного человека } A = d^2\sqrt{\frac{3}{4}} = 0,866d^2$$

$$\text{Плотность } \rho = \frac{1}{A} = \frac{1}{0,866d^2} = \frac{1,155}{d^2}$$

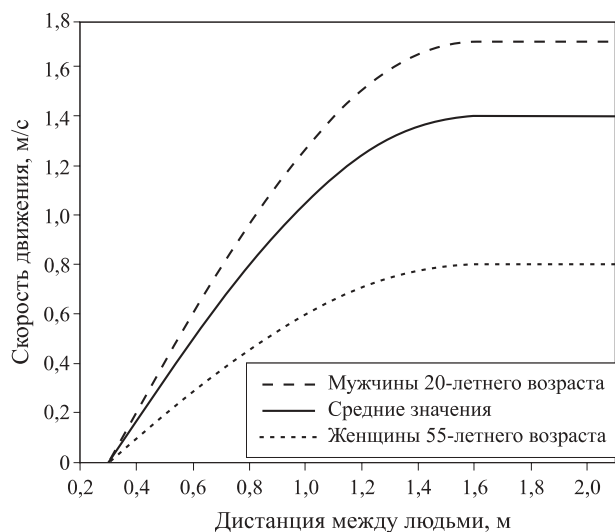
$$\text{Дистанция между людьми } d = \sqrt{1,155/\rho}$$

**Рис. 12.** Приближительное определение радиуса межличностного пространства (Thompson [55])

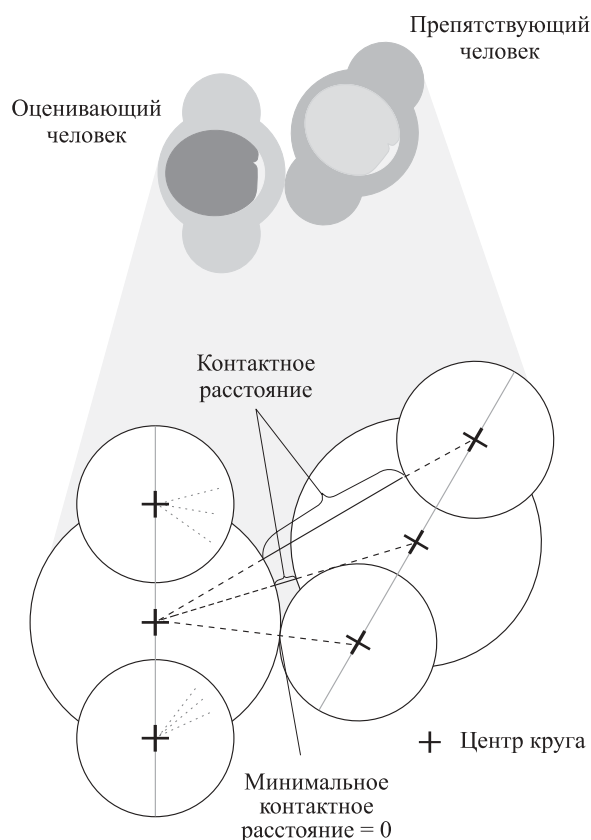


**Рис. 13.** Снижение средней скорости людского потока в зависимости от дистанции между людьми (Thompson [55])

Установление соотношения между скоростью пешеходного движения и дистанцией между людьми (см. рис. 14) позволяет с помощью Simulex делать некоторые попытки моделирования эффектов от вариаций скорости движения среди существующего населения. Рис. 15 иллюстрирует представленные в плане физические размеры людей, используемые в модели Simulex (другие непрерывные модели мо-



**Рис. 14.** Зависимость скорости движения от дистанции между людьми в Simulex [55]



**Рис. 15.** Изображение габаритов тела (на плане) и “контактного расстояния” в Simulex [55]

гут использовать аналогичное представление тела). Это означает, что в Simulex можно варьировать окружности тела, чтобы попытаться воспроизвести некоторые эффекты влияния разных размеров тела, т. е. тучности взрослых или детей. Только “непрерывные” модели, такие как Simulex, в их нынешнем виде могут использоваться для легкого учета влияния демографических характеристик населения, таких

как размер тела, на движение и состояние потока. Результаты замены некоторыми из этих прототипов смешанных групп населения представлены в следующем разделе.

### 9. Моделирование демографических характеристик населения в Simulex

Simulex может, подобно многим другим непрерывным моделям, учитывать индивидуальные размеры людей и скоростные различия, если известны в каждый момент времени их перемещения среди толпы. Thompson с соавт. [62] ранее использовали компьютерный симулятор Simulex для количественной оценки влияния пожилых людей в отчетливо наблюдаемых изменениях демографических характеристик населения (как указано в правилах IMO [23]) и размеров тела, запрошенных в то время Шведским морским управлением (Sjöfartsverket или “SFV”) для испытаний спасательных жилетов. В табл. 2 показаны потоки, созданные в имитациях Simulex для предварительно заданных составов, т. е. комбинаций групп людей с определенными размерами тела и соответствующими им скоростями движения. Каждая группа является “ненастоящей”, так как содержит только характеристики определенных геометрических параметров. Как можно видеть из таблицы, поток изменяется как функция составляющих его групп.

Должно быть отмечено, что такой тип моделирования может быть реализован многими другими непрерывными моделями; Simulex здесь используется лишь для иллюстрации.

Мы должны осознавать условность этих имитаций, которые не наблюдаются в соответствующих исследованиях “реальной жизни”, но это создает определенный способ математического представления изменений размера тела, а также тенденций, связанных с наблюдающимся снижением скорости ходьбы пожилых пассажиров в этих имитациях. Демографические категории “пассажиры”, “экипаж” и “пожилые пассажиры” определены в документе

**Таблица 2.** Результаты имитаций потоков в Simulex для IMO [62]

| Группа (IMO)                    | Максимальная величина людского потока, чел./с (среднее по 10 испытаниям) | Пропускная способность людского потока, чел./(м·с) |
|---------------------------------|--------------------------------------------------------------------------|----------------------------------------------------|
| Пассажиры                       | 1,4                                                                      | 1,36                                               |
| Экипаж ММО                      | 1,6                                                                      | 1,58                                               |
| Пожилые пассажиры               | 1,0                                                                      | 0,88                                               |
| Взрослые                        | 1,4                                                                      | 1,28                                               |
| Взрослые в спасательных жилетах | 1,2                                                                      | 1,12                                               |

IMO “MSC Circ 1238: Guidelines for evacuation analysis for new and existing passenger ships” [23].

Результаты этого моделирования, которые представляют особый интерес, следующие:

а) исходный состав категории “пригородные пассажиры” дал норму потока 1,36, что было очень близко к нормативному “стандарту” 1,33 для здоровых взрослых людей;

б) категория “пожилые”, определенная IMO (с небольшим учетом разновозрастного состава потока), показала 35 %-ное снижение нормы потока по сравнению с основной категорией “пригородные пассажиры”;

в) категория “SFV взрослые” продемонстрировала уменьшение потока на 11 % за счет увеличившихся габаритов человека в спасательном жилете по сравнению с людьми в обычной одежде.

Эффект “пожилого” населения, демонстрирующий снижение величины потока на 35 %, может быть больше, чем прогнозировалось по данным Ando, поскольку конкретизация демографического состава потока также оказывает некоторое влияние на общие значения параметров движения, в частности потока с пожилыми пассажирами. Увеличение размера тела приводит к относительно небольшому снижению скорости потока по сравнению с данными Паулса, Предтеченского и Милинского за счет учета увеличивающихся габаритов только торса человека или только ширины современного спасательного жилета. Не принимается во внимание возможное снижение скорости ходьбы, связанное с ожирением и физиологическими заболеваниями из-за ожирения.

### 10. Обсуждение: расчеты, модели и проектирование

Мы рассмотрели две первичные демографические тенденции, которые, как прогнозируется, влияют на величину людского потока и общую скорость движения:

а) “старение общества”, что, как прогнозируется, приведет к значительно более высокой доле пожилых людей в разных странах OECD, а в некоторых странах по прогнозам к 2050 году более 60 % взрослого населения будет старше 65 лет. Если мы используем цифры из анализа увеличения доли пожилых людей в обществе в целом в сочетании с анализом Ando скоростей ходьбы людей старше 65 лет, то мы могли бы принимать снижение скорости на 20 % в качестве показателя воздействий на величину потока, которые обсуждались в предыдущих разделах. Данные Холщевникова [2, 3] указывают на потенциальное падение около 40 %, но дают фактическое пиковое значение, которое на 20 % ниже типичного значения 1,33 чел/(м·с). Моделирование Simulex привело к значительному снижению скоро-

сти потока на 35 %, но мы предполагаем, что необходимо провести дополнительные проверки изменений структуры населения по ИМО в сравнении с его существующей структурой, прежде чем более широко использовать результаты этих компьютерных предположений. Для моделей, использующих усредненные характеристики потока, мы должны были бы назначить 20 % как показатель общего снижения скорости и других параметров потока, отражающий влияние “пожилой” популяции;

б) “эпидемия ожирения” и тенденция повышения “избыточного веса” населения во многих современных обществах. Мы использовали следующие показатели снижения скорости ходьбы: тесты Паулса с использованием зимней одежды (снижение на 10–20 % при ношении зимней одежды); анализ Предтеченского и Милинского влияния на увеличение размеров тела более тяжелой одежды (уменьшение интенсивности движения на 25 %), показатель Spearpoint и Macleannan (20 %) [40] и увеличение торса людей в спасательных жилетах при имитациях Simulex (11 %).

Для моделей эвакуации, использующих общие скорости потока, мы бы установили 20 % для учета в составе потока людей, страдающих ожирением, поскольку мы ожидаем, что последствия от ожирения будут, по крайней мере, такими же, как и при ношении тяжелой одежды, и, вероятно, будет также учитываться снижение скорости ходьбы для более выраженных случаев ожирения.

Рассмотрим комбинированное влияние этих двух демографических тенденций в следующем уравнении:

$$q_d = q(F_e F_o), \quad (3)$$

где  $q_d$  — номинальная удельная пропускная способность потока для проектирования или моделирования;

$q$  — нескорректированная удельная пропускная способность потока для его “стандартного” состава;

$F_e$  — коэффициент, учитывающий фактор преобладания пожилых людей в потоке;

$F_o$  — коэффициент, учитывающий фактор преобладания людей, страдающих ожирением, в потоке.

При приведенных выше численных значениях, т. е.  $F_e = 1 - 0,2 = 0,8$  и  $F_o = 1 - 0,20 = 0,8$ , и широко распространенной “стандартной” удельной пропускной способности 1,33 чел./ (м·с) имеем:

$$q_d = 1,33 \cdot (0,8 \cdot 0,8) = 1,33 \cdot 0,64 = 0,85. \quad (4)$$

Исходя из этих расчетов, предполагается, что мы могли бы рассматривать удельную пропускную способность потока 0,85 чел./ (м·с) (на 36 % меньше 1,33 чел./ (м·с)) для учета тенденций демографиче-

ских изменений населения, прогнозируемых OECD на 2050 год. Действительно, некоторый понижающий коэффициент должен применяться и в текущей практике проектирования, поскольку большая часть этих изменений уже произошла.

Вышеприведенный расчет был проведен не для того, чтобы предложить еще одно простое, “всеобщее” значение для всех проектировщиков всех видов зданий с целью применять его в будущем. Это просто примерный расчет, который используется для определения потенциальных последствий в обычных условиях. В действительности, в различных зданиях должна быть исследована демографическая структура населения. Можно поспорить, что аналогичные факторы применимы к зданиям с разнородным населением или с присутствием людей с ограниченными физическими возможностями. Такие факторы можно было бы использовать для алгоритмов компьютерных моделей с заранее определенными характеристиками потока, просто изменяя кривые зависимостей скорости от плотности. Тогда моделирование будет демонстрировать изменения соответствующих тенденций в потоке. Это не относится к “непрерывным” моделям движения, которые вместо этого должны основываться на индивидуальных характеристиках и содержать алгоритмы, реалистично воспроизводящие воздействия этих характеристик.

## 11. Дополнительные факторы

Признано, что в будущем необходимо будет учитывать дополнительные факторы, которые могут влиять на скорость людского потока и способность успешно эвакуироваться. В этой статье основное внимание было уделено необходимости использования компьютерных моделей для учета демографических изменений, но общий принцип состоит в том, что необходимо применять более гибкие вычисления и уходить от концепции однозначности, которая полагает “все одинаково” для всех случаев.

В будущем также должны учитываться следующие аспекты:

1. Биомеханика ходьбы: более подробный анализ биомеханики ходьбы требуется для более полного понимания основных механизмов при моделировании ситуации. Такие факторы, как длина ног, длина шага, колебания тела, модели походки, вспомогательные средства ходьбы и т. д., могут быть учтены в будущем. Кроме того, для населения, в составе которого могут доминировать пожилые люди и люди с разными физическими возможностями, разумно учитывать, что все большее число жителей может нуждаться в помощи (или во вспомогательных средствах для ходьбы, или в помощи персонала), чтобы добраться до выхода. Параметрическая количест-

венная оценка таких факторов потребуется до того, как будет предпринята попытка моделирования, но присущие ей сложности никоим образом не должны приводить к уклонению от учета этих факторов. Вполне вероятно, что подходы к компьютерному моделированию должны способствовать дальнейшему развитию подходов “непрерывных моделей”, рассматривающих изменения движения из-за воздействий лиц, находящихся вне потока, и в возможных точках контакта при высоких плотностях, когда “сдавливание” может стать риском.

2. Усталость: потенциальное снижение скорости ходьбы, возникающее после преодоления длинного пути эвакуации, характерное для высотных зданий, может иметь важное значение, особенно если участвующие в процессе люди пожилые, страдающие ожирением либо имеющие другие моторно-сенсорные нарушения.

3. Токсичность дыма: некоторые компьютерные симуляции используют модель фракционной эффективной дозы [63] для учета возможного влияния токсичности дыма на скорость ходьбы. Однако такое воздействие на здоровье также следует рассматривать в контексте демографии населения. Например, пожилые люди могут быть гораздо более восприимчивыми к вдыханию дыма.

Имеется ряд последствий для проектирования зданий. Если эта форма численного анализа дает целесообразные указания по выполнению элементов здания для размещения эвакуирующихся потоков, то нам понадобятся более широкие проходы и двери, для того чтобы произвести необходимые изменения пропускной способности этих элементов. Такие коррективы должны учитывать состав населения зданий в настоящее время и в будущем. Простое увеличение ширины проходов не должно быть единственным способом — мы должны учитывать изменения способностей и мобильности, связанные с изменениями в возрасте, степенью ожирения и увеличением доли людей со “смешанными способностями”, для передвижения в построенной среде и достижения выхода, ведущего в безопасное место. Руководства по проектированию должны быть пересмотрены и компьютерные модели обновлены. Нам может также потребоваться рассмотреть вопрос о том, какие организационные меры можно принимать для обеспечения безопасной для всех эвакуации.

## 12. Выводы

Сегодня представление движения людских потоков в существующих моделях эвакуации, как правило, основано на старых данных, которые не учитывают увеличение доли пожилых людей и людей, страдающих ожирением. В связи с этим модели людских “потоков” и подходы к проектированию необходимо пересмотреть. Как подчеркивалось в этой публикации, доля пожилых людей и людей, страдающих ожирением, увеличилась за последние 40 лет, и ожидается, что эти тенденции сохранятся в ближайшие 40 лет. Утверждается, что эти изменения приведут к тому, что люди будут двигаться медленнее, а в случае ожирения уменьшится допустимая плотность людского потока, выражаемая в количестве человек на квадратный метр. Таким образом, поток, который является результатом скорости движения и плотности, уменьшился за последние 40 лет и, как ожидается, еще больше сократится в ближайшие 40 лет. Это имеет значительные последствия для пожарной безопасности и безопасности жизнедеятельности в существующих зданиях, которые были спроектированы на основе старых данных и эвакуация из которых в будущем может занять больше времени, чем предполагалось первоначально. Кроме того, устаревшие данные, используемые в моделях эвакуации, влияют на точность текущих расчетов зданий. Эта статья имеет углубленное освещение проблемы увеличения доли пожилых людей и людей, страдающих ожирением, в обществе, но для решения этой проблемы необходимы дополнительные исследования. Утверждается, что лучший способ решения — пересмотреть движение людского потока, принимая в расчет взаимодействие людей, что является иным подходом к сложившемуся пониманию движения толпы. Предполагается, что существующие потоки могут измениться более чем на 36 %. Этот изменяющийся фактор (или его причины) можно было бы использовать для модификации руководств по проектированию или нормативно-правовой документации на ближайшее время, пока не будет получено более точное понимание сложных взаимодействий биомеханики и прогнозируемых демографических изменений населения.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Kholshchevnikov V. V., Samoshin D. A., Parfyonenko A. P., Belosokhov I. R. Study of children evacuation from pre-school education institutions // *Fire and Materials*. — 2012. — Vol. 36, issue 5-6. — P. 349–366. DOI: 10.1002/fam.2152.
2. 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 5<sup>th</sup> International Symposium “Human Behaviour in Fire”*. — Cambridge, UK, 2012. — P. 587–593.

3. *Kholshevnikov V. V., Shields T. J., Boyce K. E., Samoshin D. A.* Recent developments in pedestrian flow theory and research in Russia // *Fire Safety Journal*. — 2008. — Vol. 43, issue 2. — P. 108–118. DOI: 10.1016/j.firesaf.2007.05.005.
4. *Предтеченский В. М., Милинский А. И.* Проектирование зданий с учетом организации движения людских потоков. — М. : Стройиздат, 1969. — 247 с.
5. *Hankin B. D., Wright R. A.* Passenger flow in subways // *Operational Research Quarterly*. — 1958. — Vol. 9, No. 2. — P. 81–88. DOI: 10.2307/3006732.
6. *Fruin J. J.* Pedestrian planning and design. — New York : Metropolitan Association of Urban Designers and Environmental Planners Inc., 1971.
7. *Pauls J.* Movement of people // *The SFPE Handbook of Fire Protection Engineering* / DiNenno P. J., Beyer C. L., Custer R. L. P., Walton W. D., Watts J. M. W., Drysdale D., Hall J. R. (eds.). — 2<sup>nd</sup> ed. — Quincy, MA : National Fire Protection Association, 1996. — P. 3-263–3-285.
8. *Pauls J. L., Fruin J. J., Zupan J. M.* Minimum stair width for evacuation, overtaking movement and counterflow. Technical bases and suggestions for the past, present and future // *Pedestrian and Evacuation Dynamics* / Waldau N., Gattermann P., Knoflacher H., Schreckenberger M. (eds.). — Berlin : Springer Verlag, 2005. — P. 57–69. DOI: 10.1007/978-3-540-47064-9\_5.
9. World Population Ageing 2013 / United Nations, Department of Economic and Social Affairs, Population Division. — New York : United Nations, 2013. URL: <http://www.un.org/en/development/desa/population/publications/pdf/ageing/WorldPopulationAgeing2013.pdf>.
10. World Population Prospects: the 2012 revision, key findings and advance tables / United Nations, Department of Economic and Social Affairs, Population Division. — New York : United Nations, 2013. URL: <https://informationsociety.files.wordpress.com/2015/01/wpp2012-key-findings.pdf>.
11. Obesity Update 2012 / Organisation for Economic Co-operation and Development (OECD), 2012. URL: <http://www.oecd.org/health/49716427.pdf>.
12. *Kuligowski E. D., Peacock R. D., Reneke P. A., Wiess E., Hagwood C. R., Overholt K. J., Elkin R. P., Averill J. D., Ronchi E., Hoskins B. L., Spearpoint M.* Movement on stairs during building evacuations / NIST Technical Note 1839. — USA : National Institute of Standards and Technology, 2015. DOI: 10.6028/NIST.TN.1839.
13. *Pauls J. L.* Building evacuation: research findings and recommendations // *Fires and Human Behaviour* / Cantor D. (ed.). — New York : John Wiley & Sons, 1980. — P. 251–275.
14. *Peacock R. D., Hoskins B. L., Kuligowski E. D.* Overall and local movement speeds during fire drill evacuations in buildings up to 31 stories // *Safety Science*. — 2012. — Vol. 50, issue 8. — P. 1655–1664. DOI: 10.1016/j.ssci.2012.01.003.
15. *Ando K., Ota H., Oki T.* Forecasting the flow of people // *Railway Research Review*. — 1988. — Vol. 45, No. 2. — P. 8–14 (Japanese).
16. *Boyce K. E., Shields T. J., Silcock G. W. H.* Towards the characterization of building occupancies for fire safety engineering: capabilities of disabled people moving horizontally and on an incline // *Fire Technology*. — 1999. — Vol. 35, issue 1. — P. 51–67. DOI: 10.1023/a:1015339216366.
17. Guide to Safety at Sports Grounds (Football) (also known as the ‘Green Guide’). — 3<sup>rd</sup> ed. — UK : HMSO, 1985.
18. *Nelson H. E., MacLennan H. A.* Emergency movement // *The SFPE Handbook of Fire Protection Engineering* / DiNenno P. J., Beyer C. L., Custer R. L. P., Walton W. D., Watts J. M. W., Drysdale D., Hall J. R. (eds.). — 2<sup>nd</sup> ed. — Quincy, MA : National Fire Protection Association, 1996. — P. 3-286–3-295.
19. PD 7974-6:2004. The application of fire safety engineering principles to fire safety design of buildings. Human factors. Life safety strategies. Occupant Evacuation, behaviour and condition (Sub-system 6). — London, UK : British Standards Institution, 2004.
20. Report by SCICON Ltd. on safety in football stadia: a method of assessment / Lord Justice Taylor’s Final Report, Technical Working Part on the Guide to Safety at Sports Grounds. — UK : Home Office, 1989.
21. The Building Regulations 2000. Approved Document B: Fire Safety (Volume 2 — Buildings other than dwelling houses). — 2006 ed. — Department of Communities and Local Government (DCLG), 2007.
22. NFPA 101. Code for safety to life from fire in buildings and structures. — Washington, DC : U. S. Department of Commerce, 2012.
23. Guidelines for evacuation analysis for new and existing passenger ships / MSC.1/Circ.1238. — London : International Maritime Organisation, October 2007.
24. 2012 Disability Status Report. United States. — Ithaca, NY : Cornell University, Employment and Disability Institute, 2012. — 64 p. URL: [http://www.disabilitystatistics.org/StatusReports/2012-PDF/2012-StatusReport\\_US.pdf](http://www.disabilitystatistics.org/StatusReports/2012-PDF/2012-StatusReport_US.pdf).

25. *Older S. J.* Movement of pedestrians on footways in shopping streets // *Traffic Engineering and Control*. — 1968. — Vol. 10. — P. 160–163.
26. *Polus A., Schofer J. L., Ushpiz A.* Pedestrian flow and level of service // *Journal of Transportation Engineering*. — 1983. — Vol. 109, issue 1. — P. 46–56. DOI: 10.1061/(asce)0733-947x(1983)109:1(46).
27. *Pauls J. L.* In: *Fires and Human Behaviour* / *Canter D.* (ed.). — London : John Wiley & Sons Ltd., 1980. — P. 227–275, Chapters 13 and 14.
28. *Society at a glance: OECD social indicators*. — Paris : OECD Publishing, 2006.
29. *Martin J. A., Hamilton B. E., Osterman M. J. K., Curtin S. C., Mathews T. J.* Births: final data for 2012 // *National Vital Statistics Reports*. — Vol. 62, No. 9. — Hyattsville, MD : National Center for Health Statistics, 2013.
30. *Arias E.* United States Life Tables, 2006 // *National Vital Statistics Reports*. — 2010. — Vol. 58, No. 21. — 40 p. URL: [http://www.cdc.gov/nchs/data/nvsr/nvsr58/nvsr58\\_21.pdf](http://www.cdc.gov/nchs/data/nvsr/nvsr58/nvsr58_21.pdf).
31. *Have kids, settle down: marital and maternal age since 1938* / UK Parliament Research Publications, 2013. URL: <http://www.parliament.uk/business/publications/research/olympic-britain/population/have-kids-settle-down/>.
32. *The 2015 ageing report: economic and budgetary projections for the 28 EU Member States (2013–2060)*. — Brussels : European Commission, 2015. — 424 p.
33. *Reeves N. D., Spanjaard M., Mohagheghi A. A., Baltzopoulos V., Maganaris C. N.* The demands of stair descent relative to maximum capacities in elderly and young adults // *Journal of Electromyography and Kinesiology*. — 2008. — Vol. 18, issue 2. — P. 218–227. DOI: 10.1016/j.jelekin.2007.06.003.
34. *Kang H. G., Dingwell J. B.* Effects of walking speed, strength and range of motion on gait stability in healthy older adults // *Journal of Biomechanics*. — 2008. — Vol. 41, issue 14. — P. 2899–2905. DOI: 10.1016/j.jbiomech.2008.08.002.
35. *Fujiyama T., Tyler T.* Free walking speeds on stairs: effects of stair gradients and obesity of pedestrians // *Pedestrian and Evacuation Dynamics* / *Peacock R., Kuligowski E., Averill J.* (eds.). — Boston, MA : Springer, 2011. — P. 95–105. DOI: 10.1007/978-1-4419-9725-8\_9.
36. *Triggle N.* Fat patients ‘prompts ambulance fleet revamp’ // *BBC News. Health*. — 3 February, 2011. URL: <http://www.bbc.co.uk/news/health-12287880>.
37. *Obesity and overweight* // *WHO Fact sheet No. 311*, 2015. URL: <http://www.who.int/mediacentre/fact-sheets/fs311/en/>.
38. *Fryar C. D., Carroll M. D., Ogden C. L.* Prevalence of obesity among children and adolescents: United States, trends 1963–1965 through 2009–2010. — Hyattsville, MD : National Center for Health Statistics, 2012. — 6 p. URL: [http://www.cdc.gov/nchs/data/hestat/obesity\\_child\\_09\\_10/obesity\\_child\\_09\\_10.htm](http://www.cdc.gov/nchs/data/hestat/obesity_child_09_10/obesity_child_09_10.htm).
39. *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.
40. *Spearpoint M., MacLennan H. A.* The effect of an ageing and less fit population on the ability of people to egress buildings // *Safety Science*. — 2012. — Vol. 50, issue 8. — P. 1675–1684. DOI: 10.1016/j.ssci.2011.12.019.
41. *Hulens M., Vansant G., Claessens A. L., Lysens R., Muls E.* Predictors of 6-minute walk test results in lean, obese and morbidly obese women // *Scandinavian Journal of Medicine and Science in Sports*. — 2003. — Vol. 13, issue 2. — P. 98–105. DOI: 10.1034/j.1600-0838.2003.10273.x.
42. *He X. Z., Baker D. W.* Body mass index, physical activity, and the risk of decline in overall health and physical functioning in late middle age // *American Journal of Public Health*. — 2004. — Vol. 94, issue 9. — P. 1567–1573. DOI: 10.2105/ajph.94.9.1567.
43. *Kuligowski E. D., Peacock R. D.* A review of building evacuation models / *NIST Technical Note 1471*. — Washington : U. S. Government Printing Office, 2005. — 156 p. DOI: 10.6028/nist.tn.1471.
44. *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.
45. *Stahl F.* Final report on the “BFIRES/Version 1” computer simulation of emergency egress behaviour during fires: calibration and analysis / *NBSIR 79-1713*. — Washington, DC : U. S. Department of Commerce, NBS, Center for Building Technology, March 1979. DOI: 10.6028/nbs.ir.79-1713.
46. *Kisko T. M., Francis R. L.* EVACNET+: A computer program to determine optimal building evacuation plans // *Fire Safety Journal*. — 1985. — Vol. 9, issue 2. — P. 211–220. DOI: 10.1016/0379-7112(85)90009-8.
47. *Fahy R. F.* EXIT 89: An evacuation model for high-rise buildings // *Proceedings of the 3<sup>rd</sup> International Symposium of Fire Safety Science*. — London : Elsevier Science Publishers, 1991. — P. 815–823.

48. Ketchell N., Cole S. The EGRESS code for human movement and behaviour in emergency evacuations // Engineering for Crowd Safety / Smith R. A., Dickie J. (eds.). — Amsterdam : Elsevier, 1993. — P. 361–370.
49. Galea E. R., Galparsoro J. M. P., Pearce J. A brief description of the EXODUS evacuation model // Proceedings of the 18<sup>th</sup> International Conference on Fire Safety. — San Francisco, USA, 1993. — Vol. 18. — P. 149–162.
50. STEPS — simulation of transient evacuation and pedestrian movements. User Manual. — Croydon: Mott MacDonald Group, 2003 (unpublished work).
51. Klupfel H., Meyer-Konig T. Characteristics of the PedGo software for crowd movement and egress simulation // Proceedings of the 2<sup>nd</sup> International Conference in Pedestrian and Evacuation Dynamics (PED). — London, UK : University of Greenwich, 2003. — P. 331–340.
52. Thompson P. A., Marchant E. W. A computer model for the evacuation of large building populations // Fire Safety Journal. — 1995. — Vol. 24, issue 2. — P. 131–148. DOI: 10.1016/0379-7112(95)00019-p.
54. Legion International. URL: <http://www.legion.com/legion-software>.
55. Thompson P. A. Developing new techniques for modelling crowd movement : Ph. D. — Scotland, University of Edinburgh, Department of Building and Environmental Engineering, 1995.
56. Cappuccio J. Pathfinder: a computer-based timed egress simulation // Fire Protection Engineering. — 2000. — Vol. 8. — P. 11–12.
57. TraffGO “Product Information — PedGo Editor”. Pamphlet, 2005.
58. Oasys MassMotion // AEC Magazine. — 25 July 2011. URL: <http://aecmag.com/software-mainmenu-32/445-oasys-massmotion>.
59. 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/089e83048beefc756bf17a210f0efff0b8b3.pdf>.
60. Togawa K. Study of fire escapes basing on the observation of multitude currents: Report No. 14. — Tokyo : Building Research Institute, 1955.
61. Pauls J. L. In: Fires and Human Behaviour / Canter D. (ed.). — London : John Wiley & Sons Ltd., 1980. — P. 227–275, Chapters 13 and 14.
62. Thompson P., Lindstrom H., Olsson P. A., Thompson S. Simulex: analysis and changes for IMO compliance // Proceedings of the Second International Conference in Pedestrian and Evacuation Dynamics (PED). — London : University of Greenwich, 2003.
63. Purser D. A. Toxicity assessment of combustion products // SFPE Handbook of Fire Protection Engineering / DiNenno P. J. et al. (eds.). — 3<sup>rd</sup> ed. — Quincy, MA : National Fire Protection Association, 2002. — P. 2-83–2-171.

**А. Ю. ИВАНОВ**, д-р техн. наук, профессор, профессор кафедры системного анализа и антикризисного управления, Санкт-Петербургский университет ГПС МЧС России (Россия, 196105, г. Санкт-Петербург, Московский просп., 149; e-mail: alexandr.y@mail.ru)

**О. А. РЫБИН**, д-р техн. наук, профессор кафедры системного анализа и антикризисного управления, Санкт-Петербургский университет ГПС МЧС России (Россия, 196105, г. Санкт-Петербург, Московский просп., 149; e-mail: oleg\_rybin65@mail.ru)

УДК 656.085.5+004.9

## ИНФОРМАЦИОННО-ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЕ АСПЕКТЫ ОБЕСПЕЧЕНИЯ ПОЖАРНОЙ БЕЗОПАСНОСТИ НА ТРАНСПОРТЕ

Рассмотрены ключевые аспекты обеспечения пожарной безопасности транспортной системы на основе современных и перспективных информационных технологий. Выявлена проблема совершенствования процессов управления пожарными рисками на транспорте, обусловленная спецификой предметной области. Показано, что решить указанную проблему можно на основе формирования информационного пространства пожарной безопасности на транспорте и применения передовых подходов анализа данных, аккумулируемых в названном пространстве. Рассмотрены принципы и архитектурное построение информационного пространства. Исследованы методы обработки больших объемов данных и анализа этих данных для получения новых знаний о пожарных рисках на транспорте. Сделан вывод о целесообразности применения рассмотренных информационно-технологических подходов для обеспечения пожарной безопасности на транспорте в части управления пожарными рисками.

**Ключевые слова:** транспортная система; пожарный риск; управление рисками; информационное пространство; большие данные; информационные технологии.

**DOI:** 10.18322/PVB.2017.26.07.56-64

### Введение

Российская Федерация обладает масштабной и разветвленной транспортной системой (сети автомобильных и железных дорог, водные коммуникации, авиалинии, городской транспорт, трубопроводы и т. д.). От защищенности перечисленных объектов в существенной мере зависит национальная безопасность и устойчивое экономическое развитие страны. Естественно, что современные объекты транспортной инфраструктуры оснащены силами и средствами предотвращения природных, техно- и антропогенных аварий и катастроф, противодействия им и ликвидации последствий. Тем не менее в настоящее время и в перспективе практически нереально полностью исключить возможность серьезных нарушений нормального функционирования транспортной системы. В связи с этим немалую долю угроз безопасности транспортных средств и инфраструктуры несут риски возникновения пожаров как локального, так и масштабного характера.

К таким факторам рисков относятся:

- природные явления (землетрясения, ураганы, аномальные погодные условия);

- особо опасные объекты, находящиеся на незначительном удалении от транспортных линий и узлов (предприятия и склады повышенной опасности, арсеналы, полигоны);
- боевые действия;
- действия человека (террористические акты, поджоги, иные хулиганские поступки, ошибки и халатность обслуживающего персонала);
- ограниченная надежность транспортных средств;
- износ транспортных коммуникаций и др.

Предотвращение пожаров на объектах транспортной системы, своевременное реагирование на проявление рисков пожарной опасности, а также оперативная ликвидация возникших пожаров и их последствий требуют незамедлительного (в ряде случаев упреждающего) информирования должностных лиц различных ведомств и служб (МЧС, Минтранс, МВД, Минздрав, Росгвардия и др.), органов исполнительной власти и местного самоуправления, а также населения.

Управление столь разнообразными и многочисленными в своих проявлениях рисками невозможно без привлечения современных информационных

коммуникационных технологий. С учетом территориальной распределенности транспортной системы следует обратить внимание на развивающуюся концепцию *интеллектуальной мультимодальной транспортной системы* (ИМТС) и ее единого информационного пространства [1–3]. В аспекте следования принципам указанной концепции и требованиям современных условий актуальность научных изысканий, связанных с развитием информационного базиса управления пожарными рисками, не вызывает сомнений.

Целью настоящего исследования является анализ необходимости и возможности применения передовых информационных технологий для обеспечения пожарной безопасности на транспорте. Такая цель определяет ряд задач, составляющих структуру статьи:

- установление проблемной области и направлений исследования;
- формирование принципов построения и архитектуры информационного пространства для решения задач управления пожарными рисками на транспорте;
- выбор подходов к организации компонентов информационного пространства;
- определение характера использования компонентов информационного пространства с учетом современных тенденций в сфере интеллектуальной обработки данных.

### **Проблема совершенствования процессов управления пожарными рисками на транспорте**

В соответствии с ГОСТ Р 51901.10–2009 (ISO/TS 16732:2005) менеджмент пожарного риска (управление риском) на предприятии включает в себя оценку риска, обработку риска, принятие риска и обмен информацией о риске. В свою очередь, оценка риска как процесс состоит из двух этапов — количественной оценки риска и сравнительной оценки риска. Первый этап связан с получением численных значений показателей, характеризующих риск. Второй этап предполагает сравнение полученных значений с критериями допустимости риска. Признание недопустимости риска влечет за собой внесение изменений в объект защиты или корректировку требований к нему. Альтернативой является обработка риска и его повторная оценка. В случае допустимости риска следует описать остаточный риск, принять рассчитанный риск и обменяться информацией о нем с заинтересованными сторонами.

Расчет пожарного риска осуществляется с учетом фактического состояния систем обеспечения безопасности в соответствии с методиками МЧС России [4, 5]. Сравнение полученных значений с предельно

допустимым уровнем риска проводится согласно критериям, установленным ст. 79 и 93 Федерального закона № 123-ФЗ [6].

Для оценки вероятностных показателей пожарного риска ГОСТ Р 51901.10–2009 предписывает использовать следующие подходы:

- расчет;
- моделирование;
- экспертная оценка на основе технического и/или научного анализа.

Независимо от выбора того или иного подхода оценка риска сводится, с формальной точки зрения, к таким этапам, как сбор исходных данных, их обработка на основе некоторого математического или экспертного метода и интерпретация полученного результата.

Таким образом, наличие полной и достоверной информации о состоянии объектов, для которых проводится оценка пожарных рисков, является ключевым фактором.

Адаптация требований и рекомендаций руководящих документов [4–6] к транспортной сфере требует учета следующих особенностей этой предметной области.

Во-первых, транспортная система является распределенной и крупномасштабной как в смысле территориального размещения, так и в аспекте наличия большого числа разнообразных компонентов (предприятия транспорта, подвижной состав, объекты транспортной инфраструктуры и т. п.).

Во-вторых, на пожарные риски в транспортной сфере оказывает влияние множество обстоятельств климатического, производственного и социального происхождения, описываемых значительным числом количественных и качественных характеристик.

В-третьих, события, происходящие в самой системе и окружающей среде, относятся к категории скоротечных и изменчивых.

Совокупность перечисленных особенностей определяет необходимость широкого применения современных и перспективных информационных технологий для оценки пожарных рисков как важной составляющей пожарной безопасности на транспорте.

В ст. 11 Стратегии развития информационного общества в Российской Федерации на 2017–2030 годы [7] говорится, что “информационные и коммуникационные технологии стали частью современных управленческих систем во всех отраслях экономики, сферах государственного управления, обороны страны, безопасности государства и обеспечения правопорядка”. В ст. 36 этого же документа определяются основные направления развития российских информационных и коммуникационных технологий. К числу указанных направлений, способных существенно повысить эффективность управления по-

жарными рисками на транспорте, следует отнести такие, как:

- обработка больших объемов данных;
- искусственный интеллект;
- облачные и туманные вычисления;
- интернет вещей и индустриальный интернет.

### **Предложения по реализации новых информационно-технологических подходов при управлении пожарными рисками на транспорте**

Претворение в жизнь названных направлений обуславливает необходимость формирования *информационного пространства пожарной безопасности на транспорте* (ИППБТ). При этом роль информационного пространства представляется двоякой.

С одной стороны, ИППБТ способно стать информационным базисом, обеспечивающим обработку больших объемов данных<sup>1</sup> и реализацию методов искусственного интеллекта<sup>2</sup>. С другой стороны, оно является продуктом применения облачных и туманных технологий, интернет-технологий, а также других технологий обработки и хранения данных, ставших традиционными (компьютерные сети, базы данных и др.).

В то же время это информационное пространство должно быть неотъемлемой частью единого информационного пространства ИМТС наряду с информационными пространствами экологической безопасности, информационной безопасности, криминальной безопасности и т. д. Данный тезис дает основание для “наследования” принципов и архитектуры построения ИППБТ от метасистемы — единого информационного пространства ИМТС [2].

К основным принципам построения информационного пространства пожарной безопасности в таком случае относятся следующие:

- *принцип системности*, который предполагает рассматривать ИППБТ как один из компонентов единого информационного пространства ИМТС и в то же время как относительно самостоятельное образование, имеющее свое целевое назначение — обеспечение информационного сервиса для прикладных процессов управления пожарными рисками и пользователей, к числу которых относятся лица, ответственные за обеспечение пожарной безопасности на транспорте;
- *принцип соответствия архитектур* ИППБТ и единого информационного пространства ИМТС, который обуславливает использование сходных основных технических решений на построение;

- *принцип прозрачности*, который обеспечивает независимость прикладных процессов и пользователей от географического размещения информационных единиц в ИППБТ;
- *принцип комплексного использования* различных технологий накопления и обработки информации, который ориентирует на свободный выбор методов и средств организации ИППБТ, наиболее эффективных с точки зрения целевого назначения этого информационного пространства;
- *принцип интерпретируемости информации*, который означает необходимость предоставления информации пользователю в общепринятой форме или в терминах предметной области, связанной с управлением пожарными рисками, а прикладному процессу — в требуемом формате.

По своей сущности информационное пространство пожарной безопасности на транспорте представляет собой совокупность информационных ресурсов, создаваемых в целях предоставления информационного сервиса должностным лицам, ответственным за пожарную безопасность, и прикладным процессам управления пожарными рисками.

Следование тезису о наследовании определяет иерархический характер организации информационного пространства пожарной безопасности на транспорте. В его состав входят следующие компоненты (рис. 1):

- поле данных;
- поле информации;
- поле знаний;
- плоскость управления и информационной безопасности.

В соответствии с ГОСТ Р 51901.10–2009 оценка пожарного риска предполагает в качестве одного из начальных этапов идентификацию опасных событий. Применительно к пространственно-распределенным системам, к числу которых относится транспортная система, идентификация таких событий требует организации мониторинга контролируемого пространства.

Субъектами мониторинга (источниками информации об опасностях) могут выступать:

- датчики и регистраторы транспортной, метеорологической, радиационной и иной обстановки;
- стационарные и мобильные системы наземного видеонаблюдения различных ведомств (транспортной системы, МВД, охранных предприятий и т. п.);
- спутниковые системы наблюдения;
- воздушные системы наблюдения, устанавливаемые на пилотируемых и беспилотных летательных аппаратах;
- участники дорожного движения, наблюдатели и другие информаторы;

<sup>1</sup> В отечественных и зарубежных источниках часто фигурируют термины “Big Data” и “технология больших данных”.

<sup>2</sup> В этом случае ИППБ приобретает статус информационного пространства знаний [7].



Рис. 1. Архитектурное построение информационного пространства пожарной безопасности на транспорте

Fig. 1. Architectural construction of the Information Space for Fire Safety in Transport

- должностные лица центров и пунктов оперативного управления государственных структур (Минобороны, МИД, МВД, МЧС и др.) и местных органов управления;
- компетентные зарубежные источники;
- интернет-ресурсы, а также любые другие полезные источники.

**Поле данных** ИППБТ предполагает накопление и предварительную обработку первичной информации.

Поступающие от перечисленных источников сведения представляют собой сообщения в различных формах (текстовые, аудио- и видеосообщения и т. п.). Для них характерно представление данных в различных форматах, слабая структуризация, противоречивость, большие объемы. Наличие таких признаков позволяет классифицировать совокупность таких сообщений, поступающих непрерывно в режиме, близком к реальному времени, как “большие данные” [8]. В качестве аппаратно-программной платформы поля данных, аккумулирующего содержимое потока больших данных, предполагается строить на базе концепции сетей хранения данных либо на основе концепции “облачного” хранилища — частного или гибридного, что в максимальной степени соответствует распределенному характеру контролируемого пространства [9, 10].

Организация сбора и хранения больших данных представляет собой трудоемкую технологическую задачу, однако гораздо большей проблемой является обработка огромных объемов слабоструктурированных и неструктурированных данных, различающихся по содержанию и форме. К настоящему времени накоплен определенный опыт обобщения информации, содержащейся в больших данных, и извлечения требуемых сведений. Направление, известное как “большие данные” [11], сформировалось примерно в течение 20 лет (рис. 2). Такой подход может стать очередным шагом в развитии методов и средств выявления пожарных рисков. Переход к новым технологиям хранения и массово-параллельной обработки данных позволит значительно увеличить объем анализируемых событий для выявления инцидентов, чреватых возникновением пожаров.

Технологию больших данных можно разделить на две группы: пакетная обработка для терабайтных и больших объемов информации, требующая относительно длительного времени, и обработка потока данных — для меньших объемов и более коротких интервалов времени.

Опыт применения систем обработки больших данных в сфере информационной безопасности позволяет говорить об их перспективности по следующим причинам [12, 13]:

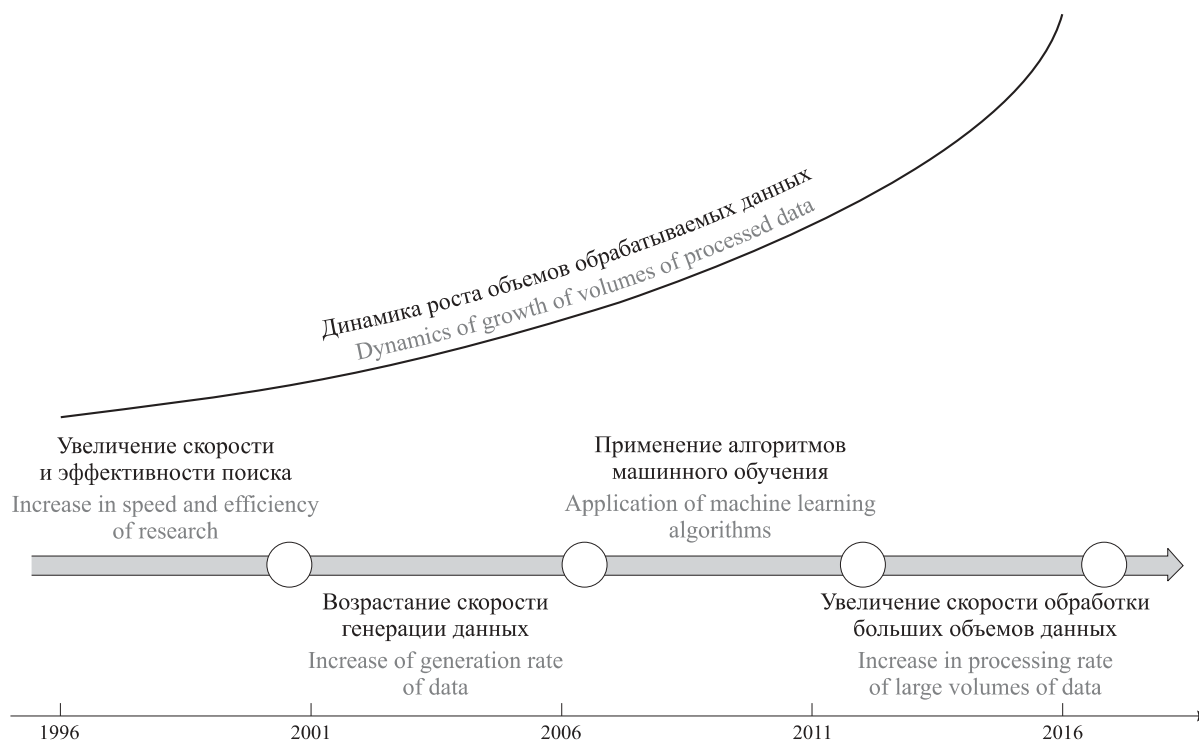


Рис. 2. Эволюция больших данных

Fig. 2. The evolution of Big Data

- возможность обработки массивов данных и проведения частотного анализа событий в объемах и временных интервалах, недоступных для традиционных систем (время обработки сокращается с нескольких месяцев до нескольких десятков минут);
- существенное повышение точности идентификации инцидентов;
- обнаружение целенаправленных устойчивых угроз.

Другим компонентом поля данных ИППБТ является база данных, которая формируется после селекции и структуризации основного потока первичной информации. Ее содержимое предназначено для решения формализованных задач управления пожарными рисками. По назначению такая база относится к классу операционных, а в смысле пространственного расположения является распределенной [2, 14].

**Поле информации** предназначено для информационной поддержки решения задач интеллектуального анализа при управлении пожарными рисками. Целью решения таких задач является прогнозирование рисков путем выявления значимых корреляций и тенденций в больших объемах данных [14]. В рассматриваемой предметной области (управление пожарными рисками) интеллектуальный анализ включает в себя следующие стадии:

- обнаружение закономерностей в поле данных ИППБТ;
- использование установленных закономерностей для предсказания неизвестных значений или линии поведения контролируемых объектов;
- анализ исключений для обнаружения и истолкования отклонений в выявленных закономерностях.

Решение задач интеллектуального анализа требует привлечения OLAP-технологий, информационную основу которых составляют хранилища данных. В состав этих хранилищ традиционно включают (помимо операционных баз данных) аналитические, темпоральные и многовариантные базы данных [14]. В топологическом плане такие хранилища могут быть централизованными или распределенными. Последний вариант имеет предпочтение при существенном географическом рассеянии источников и потребителей информации.

Методы интеллектуального анализа для обеспечения пожарной безопасности могут быть использованы в сфере управления пожарными рисками в целях выявления причинно-следственных связей и принятия решений. Обычно выделяют три типа аналитики — описательную, предсказательную и предписательную [15].

*Описательная аналитика* предназначена для обработки эмпирических данных, их систематизации, представления в наглядном виде (визуализации),

а также для количественного и качественного описания.

*Предсказательная аналитика* использует статистические методы, алгоритмы машинного обучения, теорию игр и другие методы интеллектуального анализа для построения моделей и предсказания будущих событий на основе ретроспективных и текущих данных. Важным преимуществом моделей является то, что, помимо прогнозирования, они устанавливают связи между многими факторами, позволяют оценить риски и потенциальные возможности в зависимости от конкретного набора условий (значений/величины факторов) и таким образом через управление отдельными факторами достичь нужных результатов.

*Предписательная аналитика* представляет собой предсказательную аналитику, дополненную методами исследования операций и теории принятия решений. Применительно к задачам пожарной безопасности это — управление рисками, оптимизация ресурсов и структуры системы пожарной безопасности, принятие адекватных противодействий в ответ на реальные или прогнозируемые опасности.

К настоящему времени разработано большое число аналитических моделей, методов и алгоритмов обработки данных и получения новых знаний. Основными из них являются [16]:

- анализ ассоциативных правил;
- кластерный и сегментационный анализ;
- методы классификации и регрессионного анализа;
- анализ выбросов/аномалий;
- анализ текста;
- анализ временных рядов;
- визуализация аналитических данных и др.

Применительно к управлению пожарными рисками этот инструментарий может быть использован следующим образом.

Так, *анализ ассоциативных правил* применяется для нахождения закономерностей между связанными событиями, результатом которых может явиться возникновение пожара.

*Кластерный и сегментационный анализ* позволяет группировать любые сущности или события в относительно однородные сегменты с однотипными характеристиками, что дает возможность лучше понять природу этих сущностей или событий с точки зрения пожарных рисков.

*Методы классификации и регрессионного анализа* подходят для выявления факторов, влияющих на пожарные риски.

*Анализ выбросов/аномалий* применим для обнаружения необычных явлений в работе транспортной системы, способных повлечь за собой возникновение пожара.

*Анализ текста* может использоваться для извлечения полезной информации с точки зрения управления пожарными рисками из метеосводок и метеопрогнозов, отчетов, докладов и других текстовых документов.

*Анализ временных рядов* необходим для краткосрочного или перспективного прогнозирования пожарных рисков.

*Визуализация аналитических данных* позволяет представлять статистические данные в виде таблиц, графиков, рисунков и является инструментом принятия своевременных и обоснованных решений организации оперативных действий при реагировании на пожарные риски.

Назначение **поля знаний** состоит в информационной поддержке решения трудноформализуемых задач, методы решения которых предполагают неполноту и/или нечеткость исходных данных. Помимо обобщенной информации, поступающей от полей нижних уровней иерархии, это поле предполагает хранение правил вывода, которые позволяют генерировать новую информацию на основе имеющейся.

Обеспечивающим компонентом информационного пространства пожарной безопасности на транспорте выступает **плоскость управления и обеспечения информационной безопасности**. Ее назначение определяется названием, а в состав включаются программные средства управления содержанием всех полей пространства и координации их взаимодействия, а также комплекс средств для защиты всех ресурсов информационного пространства от компьютерных атак и других нарушений информационной безопасности.

## Заключение

Управление пожарными рисками на транспорте невозможно без применения современных и перспективных информационных технологий. Проведенные аналитические исследования, результаты которых изложены в настоящей статье, позволяют сформулировать следующие **выводы**:

1) нетривиальный характер анализа пожарных рисков в столь сложной системе, которой является транспортная система, требует организации информационного пространства пожарной безопасности на транспорте;

2) основной функционал этого пространства состоит в предоставлении информационного сервиса должностным лицам, ответственным за обеспечение пожарной безопасности, и прикладным процессам, позволяющим решать задачи оценки и прогнозирования пожарных рисков;

3) процедурная часть процесса управления пожарными рисками предполагает внедрение новых

моделей, методов и алгоритмов, ориентированных на аналитику больших данных, а в дальнейшем — на технологию искусственного интеллекта.

Изложенные материалы представляют определенную значимость в силу направленности на комплексное решение проблемы совершенствования управления пожарными рисками на транспорте. Основным инструментарием здесь выступают современные информационные технологии. С их применением связано прогнозирование указанных рисков на основе полного учета разнообразных фак-

торов и интеллектуализации обработки содержательных данных.

Представленные в статье результаты могут быть использованы при организации комплексных научных исследований в сфере информатизации транспортной системы в целом и обеспечения ее пожарной безопасности в частности. Практическая реализация видится на пути сопряжения различных технологий накопления и обработки данных о пожарной обстановке на транспорте в целях формирования единого информационного базиса.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Асаул А. Н., Малыгин И. Г., Комашинский В. И., Аванесов М. Ю. Концептуальные подходы к построению интеллектуальной мультимодальной транспортной системы РФ // *Информация и космос*. — 2016. — № 3. — С. 8–17.
2. Иванов А. Ю., Комашинский В. И., Малыгин И. Г. Концепция построения единого информационного пространства интеллектуальной мультимодальной транспортной системы // *Транспорт Российской Федерации*. — 2016. — № 6(67). — С. 24–28.
3. Иванов А. Ю., Комашинский В. И., Малыгин И. Г. Мобильные распределенные базы данных Интеллектуальной мультимодальной транспортной системы : монография. — СПб. : Институт проблем транспорта им. Н. С. Соломенко РАН, 2017. — 166 с.
4. Методика определения расчетных величин пожарного риска в зданиях, сооружениях и пожарных отсеках различных классов функциональной пожарной опасности : приказ МЧС России от 30.06.2009 № 382 (ред. от 02.12.2015). URL: <http://base.garant.ru/12169057/> (дата обращения: 04.04.2017).
5. Методика определения расчетных величин пожарного риска на производственных объектах : приказ МЧС России от 10.07.2009 № 404 (ред. от 14.12.2010). URL: <http://base.garant.ru/196118/> (дата обращения: 04.04.2017).
6. Технический регламент о требованиях пожарной безопасности : Федер. закон от 22.07.2008 № 123-ФЗ (ред. от 03.07.2016). URL: <http://rulings.ru/laws/Federalnyy-zakon-ot-22.07.2008-N-123-FZ/> (дата обращения: 04.04.2017).
7. Стратегия развития информационного общества в Российской Федерации на 2017–2030 годы : утв. Указом Президента Российской Федерации от 09.05.2017 № 203. URL: <http://www.garant.ru/products/ipo/prime/doc/71570570/> (дата обращения: 25.05.2017).
8. Черняк Л. Большие Данные — новая теория и практика // *Открытые системы*. СУБД. — 2011. — № 10. — 18 с. URL: <http://www.osp.ru/os/2011/10/13010990/> (дата обращения: 12.04.2017).
9. Гургенидзе А. Т., Кореш В. И. Мультисервисные сети и услуги широкополосного доступа. — СПб. : Наука и техника, 2003. — 400 с.
10. Батура Т. В., Мурзин Ф. А., Семич Д. Ф. Облачные технологии: основные понятия, задачи и тенденции развития // *Программные продукты, системы и алгоритмы* : электронный научный журнал. — 2014. — № 1. — 22 с. DOI: 10.15827/2311-6749.10.141.
11. Bill Franks (ed.). *Taming the Big Data Tidal Wave. Finding Opportunities in Huge Data Streams with Advanced Analytics*. — John Wiley & Sons, Inc., 2012. — 336 p. DOI: 10.1002/9781119204275.
12. Big data analytics for security intelligence / Cloud Security Alliance (CSA), 2013. — 22 p. URL: [https://downloads.cloudsecurityalliance.org/initiatives/bdwg/Big\\_Data\\_Analytics\\_for\\_Security\\_Intelligence.pdf](https://downloads.cloudsecurityalliance.org/initiatives/bdwg/Big_Data_Analytics_for_Security_Intelligence.pdf) (дата обращения: 17.04.2017).
13. A Case Study in Security Big Data Analysis. — 03.09.2012. URL: <http://www.darkreading.com/monitoring/a-case-study-in-security-big-data-analys/232602339> (дата обращения: 17.04.2017).
14. Саенко И. Б. Теоретические основы многомерно-реляционного представления данных и их применение для построения баз данных АСУ связью : монография / Под ред. В. Ф. Комаровича. — СПб. : ВУС, 2001. — 176 с.
15. Big data: the next frontier for innovation, competition, and productivity / McKinsey Global Institute, May 2011. — 20 p. URL: <http://lazowska.cs.washington.edu/escience/McKinsey.big.data.pdf> (дата обращения: 17.04.2017).

16. Артамонов А. С., Иванов А. Ю. Перспективные методы анализа информационных потоков в сфере безопасности автоматизированных систем МЧС России (Информационно-аналитический обзор — Часть 2) // Вестник Санкт-Петербургского университета Государственной противопожарной службы МЧС России : научно-аналитический журнал. — 2017. — № 1. — С. 74–83.

*Материал поступил в редакцию 20 июня 2017 г.*

**Для цитирования:** Иванов А. Ю., Рыбин О. А. Информационно-технологические аспекты обеспечения пожарной безопасности на транспорте // Пожаровзрывобезопасность / Fire and Explosion Safety. — 2017. — Т. 26, № 7. — С. 56–64. DOI: 10.18322/PVB.2017.26.07.56-64.

English

## INFORMATION AND TECHNOLOGICAL ASPECTS OF FIRE SAFETY ON TRANSPORT

**IVANOV A. Yu.**, Doctor of Technical Sciences, Professor, Professor of Department of System Analysis and Crisis Management, Saint Petersburg University of State Fire Service of Emercom of Russia (Moskovskiy Avenue, 149, Saint Petersburg, 196105, Russian Federation; e-mail: alexandr.y@mail.ru)

**RYBIN O. A.**, Doctor of Technical Sciences, Professor of Department of System Analysis and Crisis Management, Saint Petersburg University of State Fire Service of Emercom of Russia (Moskovskiy Avenue, 149, Saint Petersburg, 196105, Russian Federation; e-mail: oleg\_rybin65@mail.ru)

### ABSTRACT

The article is dedicated to the basic aspects of providing of fire safety of the transportation system through the use of advanced information technology.

The management of fire risk can significantly reduce the likelihood of fires on objects of the industry. Guidance and regulatory documents (standards, orders, and methods) are given to the persons responsible for fire safety, to assess these risks with the involvement of scientific methods and the results of the assessment to respond to existing hazards. The implementation of the requirements of these documents in relation to the transport system involves the need to integrate features such as: distributed high-scale nature, exposure to a large number of various fire danger factors, dynamic transport system and the environment.

These features do not allow the use of traditional calculation methods of risk assessment and a focus on the transition to new directions, such as handling large amounts of data, artificial intelligence etc. As a result, the problem arises of improving the management processes of fire risk in transport, the solution of which is seen in the widespread introduction of information technology.

The basis which provides control of fire risks in transport and the use of new methods and technologies should be the information space fire security. Its development is planned to be formed in the context of a Single information space of the Intelligent multimodal transporting system. This thesis outlines the basic principles and the hierarchical nature of the architecture of the information space of fire safety.

The lower level of this information space — the data field — need to accumulate large amounts of data about the fire situation in the transportation system (facilities, roads, vehicles, etc.) and to solve the problem of filtering, systematization, generalization, etc. Next level is a field of information and is aimed on the extraction of useful details such as patterns and trends (predictions) of development of the fire situation, due to mining the most informative data. The upper level or field of knowledge implies the possibility of the formation of expert judgments of the fire situation.

Application processes, allowing assessing the risks and developing recommendations for their acceptance or rejection, have the opportunity to receive information service from any field depending on a task. Models, methods and algorithms can be traditional or innovative. The innovative methods that have been proven in other subject areas have shown the possibility of their effective application in the management of fire risks. These include: analysis of association rules, cluster and segmentation analysis, classification methods and regression analysis, analysis of outliers/anomalies, text analysis, time series analysis, visualization, analytical data, etc.

Thus, the implementation of considered information technologies applied to the management of fire risk in transport allows to expect positive results in the practice of countering the threats of fires.

**Keywords:** transport system; fire risk; risk management; informational area; big data; information technology.

## REFERENCES

1. Asaul A. N., Malygin I. G., Komashinsky V. I., Avanesov M. Yu. Conceptual approaches to construction of intelligent multi-modal transport system of Russia. *Informatsiya i kosmos / Information and Space*, 2016, no. 3, pp. 8–17 (in Russian).
2. Ivanov A. Yu., Komashinskiy V. I., Malygin I. G. Concept note for designing single information space of an intelligent multimodal transport system. *Transport Rossiyskoy Federatsii / Transport of the Russian Federation*, 2016, no. 6(67), pp. 24–28 (in Russian).
3. Ivanov A. Yu., Komashinskiy V. I., Malygin I. G. *Mobilnyye raspredelennyye bazy dannykh Intellektualnoy multimodalnoy transportnoy sistemy* [Mobile distributed databases of Intelligent multimodal transport system]. Saint Petersburg, Solomenko Institute of Transport Problems of the Russian Academy of Sciences Publ., 2017. 166 p. (in Russian).
4. *Technique of determination of settlement sizes of fire risk in buildings, constructions and structures of various classes of functional fire danger*. Order of Emercom of Russia on 30.06.2009 No. 382 (ed. 02.12.2015) (in Russian). Available at: <http://base.garant.ru/12169057/> (Accessed 4 April 2017).
5. *Technique of determination of settlement sizes of fire risk on production objects*. Order of Emercom of Russia on 10.07.2009 No. 404 (ed. 14.12.2010) (in Russian). Available at: <http://base.garant.ru/196118/> (Accessed 4 April 2017).
6. *Technical regulations for fire safety requirements*. Federal Law on 22.07.2008 No. 123 (ed. 03.07.2016) (in Russian). Available at: <http://rulings.ru/laws/Federalnyy-zakon-ot-22.07.2008-N-123-FZ/> (Accessed 4 April 2017).
7. *Strategy of information society development in the Russian Federation in 2017–2030*. Decree of the President of the Russian Federation on 09.05.2017 No. 203 (in Russian). Available at: <http://www.garant.ru/products/ipo/prime/doc/71570570/> (Accessed 25 May 2017).
8. Chernyak L. Big Data — a new theory and practice. *Otkrytyye sistemy. SUBD / Open Systems Journal*, 2011, no. 10. 18 p. (in Russian). Available at: <http://www.osp.ru/os/2011/10/13010990> (Accessed 12 April 2017).
9. Gurgenidze A. T., Koresh V. I. *Multiservisnyye seti i uslugi shirokopolosnogo dostupa* [Multiservice networks and broadband services]. Saint Petersburg, Nauka i tekhnika Publ. [Science and Techniques Publ.], 2003. 400 p. (in Russian).
10. Batura T. V., Murzin F. A., Semich D. F. Cloud technology: concepts, tasks and development trends. *Programmye produkty, sistemy i algoritmy. Elektronnyy nauchnyy zhurnal / Software Products, Systems and Algorithms. Electronic Scientific Journal*, 2014, no. 1. 22 p. (in Russian) DOI: 10.15827/2311-6749.10.141.
11. Bill Franks (ed.). *Taming the Big Data Tidal Wave. Finding Opportunities in Huge Data Streams with Advanced Analytics*. John Wiley & Sons, Inc., 2012. 336 p. DOI: 10.1002/9781119204275.
12. *Big data analytics for security intelligence*. Cloud Security Alliance (CSA), 2013. 22 p. Available at: [https://downloads.cloudsecurityalliance.org/initiatives/bdwdg/Big\\_Data\\_Analytics\\_for\\_Security\\_Intelligence.pdf](https://downloads.cloudsecurityalliance.org/initiatives/bdwdg/Big_Data_Analytics_for_Security_Intelligence.pdf) (Accessed 17 April 2017).
13. A Case Study in Security Big Data Analysis. 03.09.2012. Available at: <http://www.darkreading.com/monitoring/a-case-study-in-security-big-data-analys/232602339> (Accessed 17 April 2017).
14. Saenko I. B. *Teoreticheskiye osnovy mnogomerno-relyatsionnogo predstavleniya dannykh i ikh primeneniye dlya postroyeniya baz dannykh ASU svyazu* [Theoretical foundations of multidimensional relational representation of data and their application for creation of databases of communication automatic control systems]. Saint Peterburg, Military University of Communications Publ., 2001. 176 p. (in Russian).
15. *Big data: the next frontier for innovation, competition, and productivity*. McKinsey Global Institute, May 2011. 20 p. Available at: <http://lazowska.cs.washington.edu/escience/McKinsey.big.data.pdf> (Accessed 17 April 2017).
16. Artamonov A. S., Ivanov A. Yu. Advanced methods of analysis of information flows in the sphere of security of the automated systems of Emercom of Russia (Information-analytical review — Part 2). *Vestnik Sankt-Peterburgskogo universiteta Gosudarstvennoy protivopozharnoy sluzhby MChS Rossii. Nauchno-analiticheskiy zhurnal / Herald of St. Petersburg University of State Fire Service of Emercom of Russia. Scientific and Analytical Magazine*, 2017, no. 1, pp. 74–83 (in Russian).

**For citation:** Ivanov A. Yu., Rybin O. A. Information and technological aspects of fire safety on transport. *Pozharovzryvobezopasnost / Fire and Explosion Safety*, 2017, vol. 26, no. 7, pp. 56–64 (in Russian). DOI: 10.18322/PVB.2017.26.07.56-64.

**В. Ф. КОЛПАКОВ**, канд. техн. наук, доцент, Московский государственный психолого-педагогический университет (Россия, 127051, г. Москва, ул. Сретенка, 29; e-mail: v.kolpakov53@mail.ru)

УДК 614.841.42

## ПРИМЕНЕНИЕ НЕЧЕТКОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ ДЛЯ ИНФОРМАЦИОННОЙ ПОДДЕРЖКИ ПРИНЯТИЯ РЕШЕНИЙ ПРИ ЛИКВИДАЦИИ ЛЕСНЫХ ПОЖАРОВ

Рассматривается один из подходов информационной поддержки при выработке управления в условиях чрезвычайных ситуаций. Показано, что рассматриваемый алгоритм управления может быть использован при ликвидации чрезвычайных ситуаций различного характера; здесь же в качестве объекта исследования были выбраны лесные пожары. При принятии управляющих решений использован аппарат нечеткого моделирования, основанный на экспертных оценках текущей ситуации. Основные характеристики состояния пожарной обстановки представлены измерениями площади пожара и скорости ее изменения, а результирующий управляющий сигнал формировался в виде заданной скорости создания заградительной полосы. Показано, что результаты исследования могут быть использованы для оценки пожарной обстановки и выдачи адекватных рекомендаций по привлечению сил и средств для реализации необходимых темпов локализации пожара.

**Ключевые слова:** лесные пожары; математическое моделирование; нечеткое моделирование; нечеткие множества; экспертные оценки; алгоритм управления.

**DOI:** 10.18322/PVB.2017.26.07.65-73

### Введение

Серьезную опасность для окружающей среды, экономики и населения представляют пожары в условиях природы, так называемые ландшафтные пожары. По своей сути ландшафтный пожар — это стихийно распространяющееся горение, в результате которого уничтожаются леса, кустарники, запасы торфа и различные виды растительности, находящейся на его пути. Основными разновидностями ландшафтных пожаров в России являются лесные, торфяные и степные пожары. Чрезвычайную опасность представляют лесные пожары, которые, как правило, к моменту их обнаружения и началу борьбы с ними охватывают достаточно обширные территории и требуют значительных сил и средств для ликвидации. Известно, что основной и наиболее трудоемкой фазой тушения лесного пожара является его локализация. Один из основных методов локализации пожара — создание заградительных полос, обеспечивающих надежное преграждение путей его распространения [1].

Современные исследования показывают, что ход и результаты работ по ликвидации лесных пожаров зависят не только от соотношения ресурсно-экономического, морального, научно-технического и организационного потенциала противопожарных служб, но и от эффективности работы системы оперативного управления тушением пожара.

Задачи оперативного управления при тушении пожаров характеризуются случайными моментами времени поступления заявок на их решение. Обычно объем поступающей для решения задач оперативного управления информации небольшой, а частота поступлений таких задач достаточно высока. Время же для принятия решения, как правило, невелико и является лимитирующим фактором. Частота изменений исходных данных высока, а их достоверность низка. Исходя из этого точность решения задач оперативного управления обычно определяется не только достоверностью данных, но и качеством алгоритмов решения задач данного класса.

В целях повышения эффективности оперативного управления ликвидацией пожаров в настоящей статье предлагается использовать методы математического моделирования и прогнозирования. Однако в настоящее время научные и практические аспекты использования методов математического моделирования и оптимального управления в сфере управления и мониторинга пожарной обстановки проработаны не в достаточной степени. В связи с этим вопросы, связанные с внедрением математических методов в информационную среду поддержки принятия решений в условиях значительной неопределенности, являются весьма актуальными.

Большинство классических методов оптимального управления динамическими системами связано

с решением задачи оптимизации функционала качества и базируются на использовании достоверных математических моделей объектов управления. Однако применительно к пожару как объекту управления использовать такие методы просто не представляется возможным, поскольку в силу значительной случайности факторов пожара таких моделей просто не существует. В [2] была предпринята попытка для этой цели использовать метод обратных задач динамики [3], где было показано, что из-за слабой адекватности модели могут возникать значительные ошибки управления. Для придания робастных свойств (робастности) системе управления была решена задача формирования управления, обеспечивающего движение системы не по эталонной траектории, а в ее окрестности. В этом случае необходима, хотя, может, и не совсем точная, модель динамики пожара, что является проблематичным.

Цель настоящей работы — разработка алгоритма формирования управляющего сигнала на основе экспертных оценок пожарной ситуации с использованием метода нечеткого моделирования. Информационными сигналами в данном случае являются измерения площади пожара и скорости его распространения. Как будет показано ниже, знание модели пожарной ситуации здесь не требуется. Следует отметить, что попытки использовать теорию нечеткого моделирования для решения задач такого рода уже предпринимались рядом авторов, в частности при мониторинге пожарной обстановки техногенного характера [4]. Рассмотрим основные положения метода.

### Материалы и методы

В последнее время значительно возрос интерес к различным аспектам проблемы интеллектуального управления. Одним из основных направлений, связанных с этой проблемой, является использование аппарата нечеткого моделирования [5–9], основанного на теории нечетких множеств, нечеткой логики.

Использование систем управления, базирующихся на законах нечеткой логики, особенно актуально, когда данные об объекте управления скудны или вообще отсутствуют и невозможны традиционные методы его моделирования и управления. В условиях значительной неопределенности, к которым относятся лесные пожары, принятие решений зачастую осуществляется с помощью экспертных оценок. При этом лица, принимающие решения, не в полной мере могут формально представить себе этот процесс. И дело здесь не в том, что они плохо понимают то, что делают, а в том, что неопределенность лежит в самой природе принятия решения. В этих условиях при принятии решений высокая точность априори невозможна, да она не требуется и в большинстве жизненных ситуаций.

Здесь будут рассмотрены некоторые аспекты возможности нечеткого управления с использованием нечетких моделей объектов управления и управляемых систем.

Традиционная математика оперирует данными точного количественного характера: например, температура 36,6 °С, скорость 120 км/ч и т. д. Однако в жизни нам часто приходится сталкиваться с информацией нечеткого характера, например, с такой, как нормальная температура, высокая температура, низкая скорость, высокая скорость и т. д. До недавнего времени в рамках традиционной математики такую информацию использовать было невозможно. По этой причине эффективность многих методов моделирования и управления была ограничена, особенно в ситуациях, когда об объекте исследования не было ничего известно, кроме неточной информации.

Область математики, имеющая дело с неточной информацией, получила название теории нечетких множеств. Эта теория совместно с обычной математикой позволяет обрабатывать и использовать информацию любого вида.

### Теория и расчеты

#### Основы управления с использованием нечеткой логики

*Сущность теории нечетких множеств.* Как уже было сказано выше, в ряде случаев ввиду отсутствия точной информации человек оперирует качественными оценками — “низкая”, “нормальная”, “высокая” и т. п. В случае анализа состояния температуры тела эти оценки можно изобразить графически (рис. 1).

Функции  $\mu(t)$  — “низкая”, “нормальная” и “высокая” — называются функциями принадлежности.

В общем случае функция принадлежности  $\mu(x)$ :  $X \rightarrow [0; 1]$ , т. е. ставит в соответствие каждому элементу  $x \in X$  число  $\mu(x)$  из интервала  $[0; 1]$ , описывающее степень принадлежности элемента  $x$  качественному критерию (“низкая”, “нормальная” и т. д.).

Оценки такого рода еще называют информационными гранулами. Если трех гранул (для примера, используемого выше) недостаточно, то точность оценки можно увеличить включением большего количества гранул, например “очень низкая”, “очень высокая”.

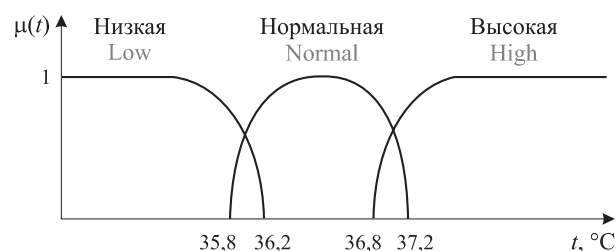


Рис. 1. Качественные оценки температуры  
Fig. 1. Qualitative temperature estimates

Информация, представленная в виде гранул, имеющих ненулевую ширину, называется нечеткой информацией.

*Основные понятия теории нечетких множеств.* В окружающем мире имеется большое число величин, которые нельзя оценить с помощью измерительных устройств, так как таковых просто не существует (например, шансы на успех в каком-либо мероприятии). Однако у каждого человека есть свое “измерительное” субъективное восприятие действительности, на основании которого, используя свои логические и интеллектуальные способности, он принимает решения. По этой причине у ученых и инженеров возникла идея создания систем с искусственным интеллектом, подобным человеческому интеллекту.

Важнейшим условием решения этой проблемы является перевод нечетких качественных оценок на язык математики, что позволит значительно расширить традиционные методы математического моделирования.

Рассмотрим основные понятия, связанные с нечеткими множествами.

Нечетким называется множество  $A$ , удовлетворяющее выражению:

$$A = \{x, \mu_A(x) | x \in X\}. \quad (1)$$

Из (1) следует, что это множество пар: объектная переменная  $x$  и функция ее принадлежности  $\mu_A(x)$  множеству  $A$ . При этом

$$\mu_A(x) \in [0; 1].$$

Функция принадлежности отображает числовую последовательность значений  $X$  данной переменной на отрезок  $[0; 1]$ :

$$\mu_A: X \rightarrow [0; 1].$$

Функция принадлежности каждому значению  $x$  ставит в соответствие некоторое число из интервала  $[0; 1]$ . Это число называется степенью принадлежности.

Одним из ключевых понятий нечеткой логики является понятие лингвистической переменной. Значения числовой переменной  $x$  интерпретируются в некую оценку на естественном языке, которая и является лингвистической переменной (“температура тела”, “температура окружающей среды”, “скорость автомобиля” и т. д.).

Значения лингвистической переменной выражаются также с помощью словесной формы (термы) и называются лингвистическими значениями (“низкая”, “высокая” и т. д.) (рис. 2). Таким образом, лингвистическая переменная — это переменная, значениями которой являются термы.

Лингвистическим терм-множеством называется множество всех лингвистических значений, исполь-

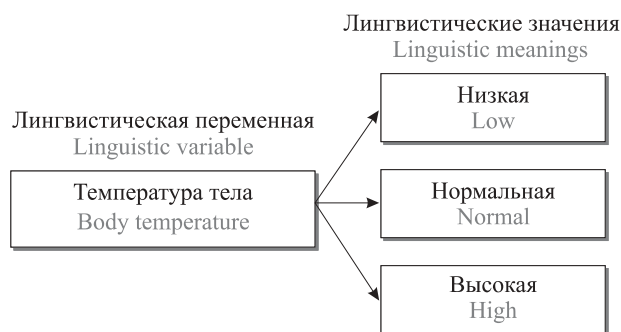


Рис. 2. Структура лингвистической переменной

Fig. 2. The structure of the linguistic variable

зуемых для определения некоторой лингвистической переменной. Для обозначения терм-множеств будем использовать запись вида (для примера на рис. 2):

$$ТТ = \{НИТ, НОТ, ВТ\},$$

где ТТ — терм-множество “температура тела”;

НИТ — “низкая температура”;

НОТ — “нормальная температура”;

ВТ — “высокая температура”.

*Типы функций принадлежности.* При малом объеме информации об объектах управления, к которым следует отнести и лесные пожары, естественным является выбор самых простых функций принадлежности — многоугольных, состоящих из прямолинейных отрезков, для нахождения параметров которых требуется наименьший объем информации по сравнению с другими функциями (рис. 3).

*Основные операции над нечеткими множествами.* Основными элементами нечетких моделей являются логические правила, например:

ЕСЛИ  $[(x_1 \text{ большое}) \text{ И } (x_2 \text{ большое})]$

ИЛИ  $[(x_1 \text{ среднее}) \text{ И } (x_2 \text{ большое})]$  ТО  $(y \text{ большое})$ ,

где  $(x_1, x_2)$  — входные величины;

$y$  — выходная величина;

“большое”, “среднее” — нечеткие множества;

ЕСЛИ – ТО, И, ИЛИ — логические связи.

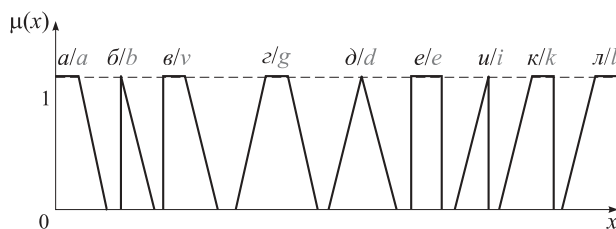


Рис. 3. Наиболее часто используемые многоугольные функции принадлежности:  $a, л$  — левая и правая крайние;  $б, и$  — асимметричные треугольные;  $в, κ$  — асимметричные трапециевидные;  $г$  — симметричная трапециевидная;  $д$  — симметричная треугольная;  $е$  — прямоугольная

Fig. 3. The most frequently used polygonal membership functions:  $a, л$  — left and right extreme;  $б, и$  — asymmetric triangular;  $в, κ$  — asymmetric trapezoidal;  $г$  — symmetric trapezoidal;  $д$  — symmetric triangular;  $е$  — rectangular

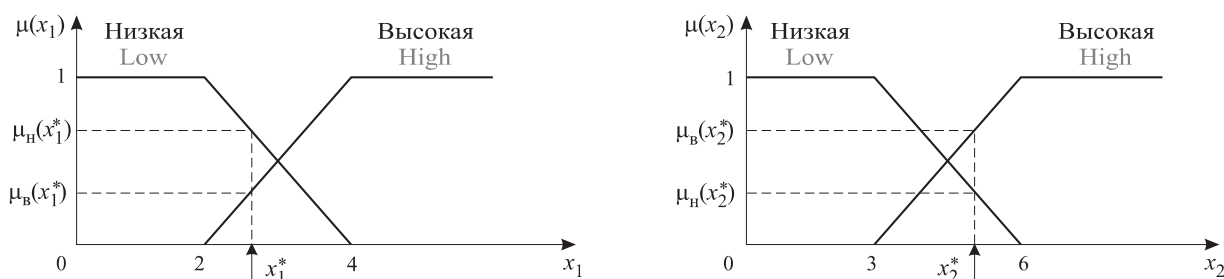


Рис. 4. Функции принадлежности входных сигналов

Fig. 4. Input functions of input signals

Для реализации таких нечетких алгоритмов используются операции логического характера. Пусть два нечетких множества  $A$  и  $B$  заданы своими функциями принадлежности  $\mu_A(x)$  и  $\mu_B(x)$ . Тогда над этими множествами можно выполнять следующие операции:

- **объединение** (дизъюнкция) двух нечетких множеств, которое соответствует операции ИЛИ и соответствует наименьшему множеству, содержащему оба множества  $A$  и  $B$ . Функция принадлежности для объединенного множества определяется с использованием операции максимума:

$$\mu_{A \cup B}(x) = \max[\mu_A(x), \mu_B(x)], \forall x \in X;$$

- **пересечение** (конъюнкция) двух нечетких множеств  $A$  и  $B$ , которое соответствует операции И

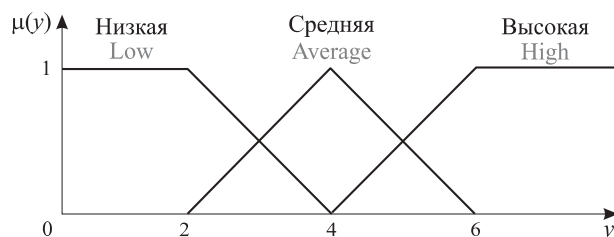


Рис. 5. Функция принадлежности выходного сигнала

Fig. 5. Function of the output signal

и определяется как наибольшее нечеткое множество, являющееся подмножеством обоих множеств. Функция принадлежности множества  $A \cap B$  определяется с помощью операции MIN:

$$\mu_{A \cap B}(x) = \min[\mu_A(x), \mu_B(x)], \forall x \in X.$$

**Нечеткое моделирование.** Рассмотрим принципы нечеткого моделирования на примере системы с двумя входами и одним выходом.

Пусть лингвистические переменные, связанные со значениями  $x_1$  и  $x_2$ , представлены лингвистическими значениями “низкая”, “высокая” и имеют функции принадлежности соответственно  $\mu(x_1)$  и  $\mu(x_2)$  (рис. 4). Функция принадлежности нечетких значений выхода  $\mu(y)$  представлена на рис. 5.

Типовая структура нечеткой модели системы приведена на рис. 6.

На вход нечеткой модели поданы два четких числовых значения  $x_1^*$ ,  $x_2^*$ . Блок *фаззификации* по функциям принадлежности вычисляет степень принадлежности этих входов нечетким множествам:  $\mu_B(x_1^*)$ ,  $\mu_H(x_1^*)$ ,  $\mu_B(x_2^*)$ ,  $\mu_H(x_2^*)$  (см. рис. 4). Здесь индексами “н” и “в” обозначены нечеткие множества “низкая” и “высокая” соответственно.

**Механизм вывода** с использованием логической базы правил осуществляет преобразование входной

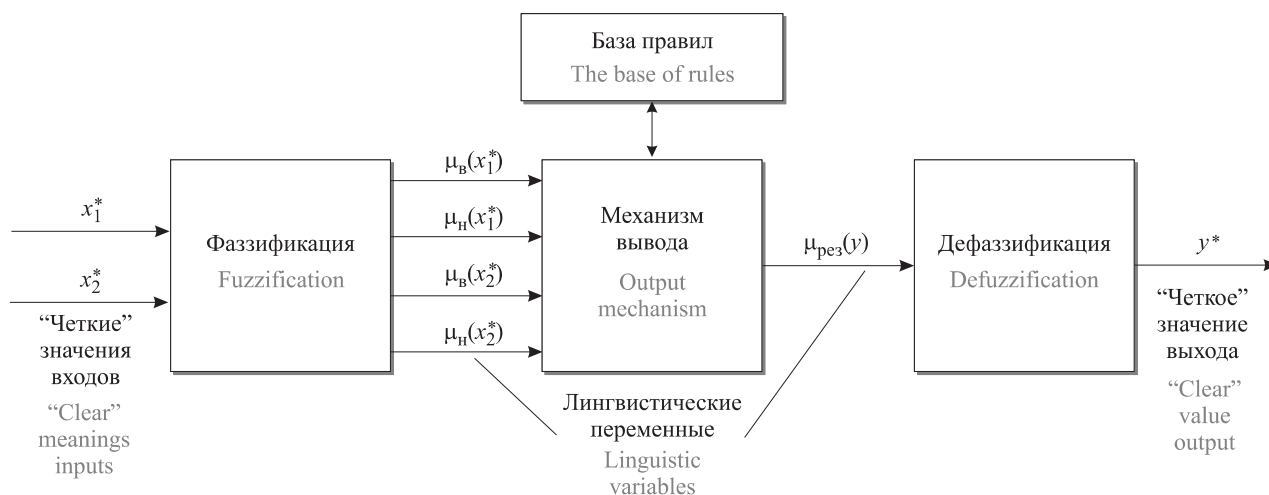


Рис. 6. Структура нечеткой модели

Fig. 6. The structure of the fuzzy model

информации ( $\mu_{\text{в}}(x_1^*)$ ,  $\mu_{\text{н}}(x_1^*)$ ,  $\mu_{\text{в}}(x_2^*)$ ,  $\mu_{\text{н}}(x_2^*)$ ) в так называемую результирующую функцию принадлежности выходного значения модели  $\mu_{\text{рез}}(y)$ . Кроме базы правил, неотъемлемым элементом блока вывода является наличие функции принадлежности выхода  $\mu(y)$  (см. рис. 5).

База правил состоит из логических правил, которые задают в системе причинно-следственные отношения между нечеткими значениями ее входных и выходных величин (см. рис. 4 и 5).

В соответствии со структурой, приведенной на рис. 6, последним этапом моделирования является операция *дефаззификации*. Смысл этой операции заключается в следующем: на основе функции принадлежности  $\mu_{\text{рез}}(y)$  с использованием некоторого метода осуществляется выбор “четкого” значения  $y^*$ , являющегося результатом для входных числовых значений  $x_1^*$ ,  $x_2^*$ .

Существует несколько методов дефаззификации. Остановимся на наиболее часто используемом *дискретном методе центра тяжести*, в котором выходное значение  $y^*$  вычисляется по формуле

$$y^* = \frac{\sum_{i=1}^n \alpha_i \tilde{y}_i}{\sum_{i=1}^n \alpha_i}, \quad (2)$$

где  $n$  — количество правил;

$\alpha_i$  — веса, учитывающие уровень выполнения условия ЕСЛИ  $i$ -го правила, называемые также уровнями активности соответствующих правил;  
 $\tilde{y}_i$  — центральные значения нечетких подмножеств ( $\mu_{\text{н}}(y)$ ,  $\mu_{\text{с}}(y)$ ,  $\mu_{\text{в}}(y)$ ) выходной переменной  $y$ .

#### Синтез нечеткого регулятора тушением лесного пожара

Будем предполагать, что в качестве входной информации для формирования алгоритма управления тушением пожара будет использоваться площадь пожара  $S(t)$  и скорость его распространения  $\dot{S}(t)$ . Результирующее управляющее решение будет сформировано в виде заданных темпов создания заградительной полосы  $\dot{u}(t)$ . Задача нечеткого регулятора будет заключаться в формировании функциональной зависимости

$$\dot{u}(t) = f(S(t), \dot{S}(t)). \quad (3)$$

Для приведения нечетких множеств к нормальному виду необходимо перейти к относительным единицам измерения:

$$\bar{S}(t) = \frac{S(t)}{S_{\text{max}}}; \quad \bar{\dot{S}}(t) = \frac{\dot{S}(t)}{\dot{S}_{\text{max}}}; \quad \bar{\dot{u}}(t) = \frac{\dot{u}(t)}{\dot{u}_{\text{max}}},$$

где  $S_{\text{max}}$  — максимально возможная (прогнозная) площадь выгоревшего лесного массива;  
 $\dot{S}_{\text{max}}$  — максимальная прогнозируемая скорость увеличения площади пожара;

$\dot{u}_{\text{max}}$  — максимально возможные темпы создания заградительной полосы.

Значения  $S_{\text{max}}$ ,  $\dot{S}_{\text{max}}$ ,  $\dot{u}_{\text{max}}$  выбираются экспертами, входящими в штаб по организации тушения пожара. Оценка этих значений осуществляется исходя из вида пожара (низовой, верховой, почвенный), его силы и масштаба, характеристик местности и лесной площади, метеорологических условий, наличия сил и средств для тушения пожара. Для задания примерных значений  $S_{\text{max}}$ ,  $\dot{S}_{\text{max}}$  можно использовать простой алгоритм, основываясь на первых измерениях (на момент выявления пожара)  $S_0$ ,  $\dot{S}_0$  и на предполагаемом времени тушения пожара.

Выбор  $\dot{u}_{\text{max}}$  должен быть согласован с максимально возможной скоростью изменения периметра пожара  $\dot{l}(t)$ . Известно, что при скорости ветра не более 5 м/с и однородном горючем материале пожар принимает грушевидную форму. Тогда, если заменить его одинаковым по площади квадратом, длина периметра пожара

$$l = 4\sqrt{S}.$$

Однако с учетом извилистости кромки пожара следует принимать

$$l = 5\sqrt{S}.$$

Тогда максимальная скорость его изменения может быть рассчитана по формуле

$$\dot{l}_{\text{max}} = 5\dot{S}_{\text{max}} / (2\sqrt{S_{\text{max}}}).$$

Для успешной локализации пожара скорость создания заградительной полосы должна быть выше скорости изменения периметра пожара, по крайней мере, в два раза, т. е.

$$\dot{u}_{\text{max}} = 2\dot{l}_{\text{max}}.$$

Нечеткий регулятор (НР) функционально представлен структурой (см. рис. 6), включающей в себя базу знаний (базу правил) и механизм логического вывода. Для данной задачи  $x_1^* = \bar{S}(t)$ ;  $x_2^* = \bar{\dot{S}}(t)$ ;  $y^* = \bar{\dot{u}}(t)$ . Результирующим выходом НР являются “четкие” значения управления  $\bar{\dot{u}}(t) = f(\bar{S}(t), \bar{\dot{S}}(t))$ , формируемые в блоке дефаззификации.

Для упрощения реализации алгоритма управления время  $t$  представим дискретными моментами времени  $t_i$  ( $i = 0, 1, 2, \dots$ ), в результате чего будем оперировать дискретными входами  $\bar{S}_i$ ,  $\bar{\dot{S}}_i$  и дискретным выходным сигналом  $\bar{\dot{u}}_i$ .

Базу правил алгоритма управления удобнее всего представить в виде таблицы решений (табл. 1), которая для данной задачи формируется экспертами. Лингвистические значения, используемые в табл. 1, имеют следующий смысл: О — “около нуля”; М — “малое”; С — “среднее”; Б — “большое”.

**Таблица 1.** База правил алгоритма управления

**Table 1.** The basis of the rules of the control algorithm

|             |   |   |             |   |   |
|-------------|---|---|-------------|---|---|
| $\bar{S}_i$ | О | О | О           | М | С |
|             | М | О | М           | С | С |
|             | С | О | С           | С | Б |
|             | Б | О | С           | Б | Б |
|             |   | О | М           | С | Б |
|             |   |   | $\bar{S}_i$ |   |   |

Таблица заполняется следующим образом. На пересечении  $j$ -й строки и  $k$ -го столбца записывается требуемое значение управления  $\bar{u}_i$ , соответствующее  $j$ -му значению  $\bar{S}_i$  и  $k$ -му значению  $\bar{S}_i$ .

Поясним логическую интерпретацию параметров этой таблицы. Пусть, например, площадь пожара  $\bar{S}_i$  невелика и принадлежит к нечеткому множеству О, а скорость изменения площади пожара  $\bar{S}_i$  — к нечеткому множеству Б. В этом случае управление должно соответствовать множеству С.

Тогда правила формирования сигнала управления можно записать в следующем виде:

П1: ЕСЛИ  $\{[(\bar{S}_i = О) \text{ И } (\bar{S}_i = О)]$   
ИЛИ  $[(\bar{S}_i = М) \text{ И } (\bar{S}_i = О)]$  ИЛИ  $[(\bar{S}_i = С) \text{ И } (\bar{S}_i = О)]$   
ИЛИ  $[(\bar{S}_i = Б) \text{ И } (\bar{S}_i = О)]$   
ИЛИ  $[(\bar{S}_i = О) \text{ И } (\bar{S}_i = М)]\}$  ТО  $\bar{u}_i = О$ ;

П2: ЕСЛИ  $\{[(\bar{S}_i = О) \text{ И } (\bar{S}_i = С)]$   
ИЛИ  $[(\bar{S}_i = М) \text{ И } (\bar{S}_i = М)]\}$  ТО  $\bar{u}_i = М$ ;

П3: ЕСЛИ  $\{[(\bar{S}_i = О) \text{ И } (\bar{S}_i = Б)]$   
ИЛИ  $[(\bar{S}_i = М) \text{ И } (\bar{S}_i = С)]$  ИЛИ  $[(\bar{S}_i = М) \text{ И } (\bar{S}_i = Б)]$   
ИЛИ  $[(\bar{S}_i = С) \text{ И } (\bar{S}_i = М)]$  ИЛИ  $[(\bar{S}_i = С) \text{ И } (\bar{S}_i = С)]$   
ИЛИ  $[(\bar{S}_i = Б) \text{ И } (\bar{S}_i = М)]\}$  ТО  $\bar{u}_i = С$ ;

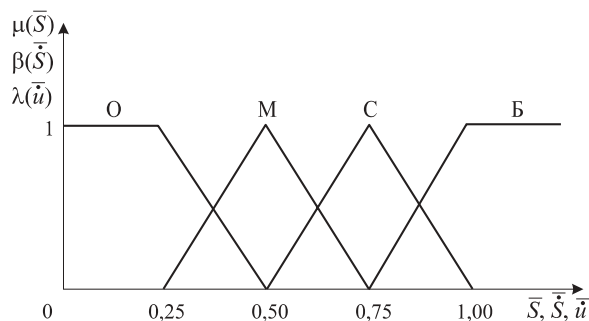
П4: ЕСЛИ  $\{[(\bar{S}_i = С) \text{ И } (\bar{S}_i = Б)]$   
ИЛИ  $[(\bar{S}_i = Б) \text{ И } (\bar{S}_i = С)]$   
ИЛИ  $[(\bar{S}_i = Б) \text{ И } (\bar{S}_i = Б)]\}$  ТО  $\bar{u}_i = Б$ .

Пусть функции принадлежности имеют форму, представленную на рис. 7. Для моделирования функций принадлежности введем параметры:  $c_1 = 0,25$ ;  $c_2 = 0,5$ ;  $c_3 = 0,75$ ;  $c_4 = 1$ ;  $a = 0,25$ .

Рассмотрим на примере функции принадлежности для сигнала  $\bar{S}$ :

$$\mu_O = \begin{cases} \omega_O, & \text{если } \bar{S} \leq c_1; \\ \omega_O \left( \frac{-c_2 + \bar{S}}{c_1 - c_2} \right) & \text{в других случаях;} \end{cases}$$

$$\mu_M = \omega_M \left( \frac{a - |\bar{S} - c_2|}{a} \right); \quad \mu_C = \omega_C \left( \frac{a - |\bar{S} - c_3|}{a} \right);$$



**Рис. 7.** Функции принадлежности входных и выходных сигналов

**Fig. 7.** Input and output accessories

$$\mu_B = \begin{cases} \omega_B, & \text{если } \bar{S} \geq c_4; \\ \omega_B \left( \frac{-c_3 + \bar{S}}{c_4 - c_3} \right) & \text{в других случаях,} \end{cases}$$

где логические переменные  $\omega = 1$ , если  $\bar{S}$  попадает в область определения соответствующей функции, отличающейся от нуля, и  $\omega = 0$  — в других случаях. Так, например,

$$\omega_M = \begin{cases} 1, & \text{если } c_2 - a \leq \bar{S} \leq c_2 + a; \\ 0 & \text{в других случаях.} \end{cases}$$

Аналогичным образом описываются функции принадлежности  $\beta(\bar{S})$ .

Используя метод максимума-минимума, осуществим фаззификацию и определим уровни активности правил  $\lambda$ :

$$\lambda_O = \max (\min(\mu_O, \beta_O), \min(\mu_M, \beta_O), \min(\mu_C, \beta_O), \min(\mu_B, \beta_O), \min(\mu_O, \beta_M));$$

$$\lambda_M = \max (\min(\mu_O, \beta_C), \min(\mu_M, \beta_M);$$

$$\lambda_C = \max (\min(\mu_O, \beta_B), \min(\mu_M, \beta_C), \min(\mu_M, \beta_B), \min(\mu_C, \beta_M), \min(\mu_C, \beta_C), \min(\mu_B, \beta_M));$$

$$\lambda_B = \max (\min(\mu_C, \beta_B), \min(\mu_B, \beta_C), \min(\mu_B, \beta_B)).$$

Осуществим дефаззификацию с помощью дискретного метода центра тяжести по формуле

$$\bar{u} = \frac{\lambda_O u_O + \lambda_M u_M + \lambda_C u_C + \lambda_B u_B}{\lambda_O + \lambda_M + \lambda_C + \lambda_B},$$

где  $u_O, u_M, u_C, u_B$  — представление функции принадлежности для управления в виде точечных подмножеств. В нашей задаче эти параметры принимали следующие значения (см. рис. 7):  $u_O = 0,25$ ;  $u_M = 0,5$ ;  $u_C = 0,75$ ;  $u_B = 1$ .

В [1, 10] были рассмотрены и обоснованы математические модели лесных пожаров. Для численного моделирования динамики тушения лесного пожара и измерения его координат  $S(t)$ ,  $\dot{S}(t)$  была использована модель вида [1]:

$$\dot{S}(t) = \alpha \sqrt{S(t)} - k \cdot u(t), \quad (4)$$

где  $\alpha$  — интенсивность распространения пожара;  
 $S(t)$  — площадь возгорания;  
 $k$  — коэффициент усиления при управлении;  
 $u(t)$  — управляющий сигнал (длина заградительной полосы).

Связь управления, формируемого нечетким регулятором ( $\dot{u}$ ), с управляющим сигналом  $u(t)$  в (4) осуществляется с помощью интеграла

$$u(t) = \dot{u}_{\max} \int_0^t \bar{u}(\tau) d\tau.$$

### Результаты и их обсуждение

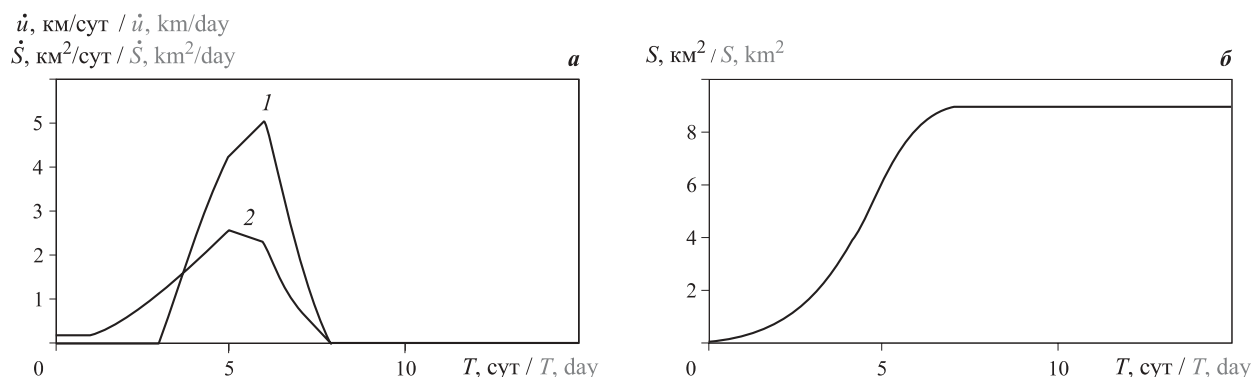
Результаты моделирования управления тушением пожара с использованием алгоритма нечеткой логики представлены на рис. 8. Программирование задачи было выполнено с помощью пакета Mathcad [11].

В эксперименте были использованы следующие масштабные параметры:  $S_{\max} = 10 \text{ км}^2$ ;  $\dot{S}_{\max} = 3 \text{ км}^2/\text{сут}$ ;  $\dot{u}_{\max} = 7 \text{ км}/\text{сут}$ .

Из рис. 8 следует, что при таких предполагаемых характеристиках пожара и возможном максимальном темпе создания заградительной полосы, равном  $7 \text{ км}/\text{сут}$ , пожар будет локализован за 6 сут, а выгоревшая площадь составит  $9 \text{ км}^2$ .

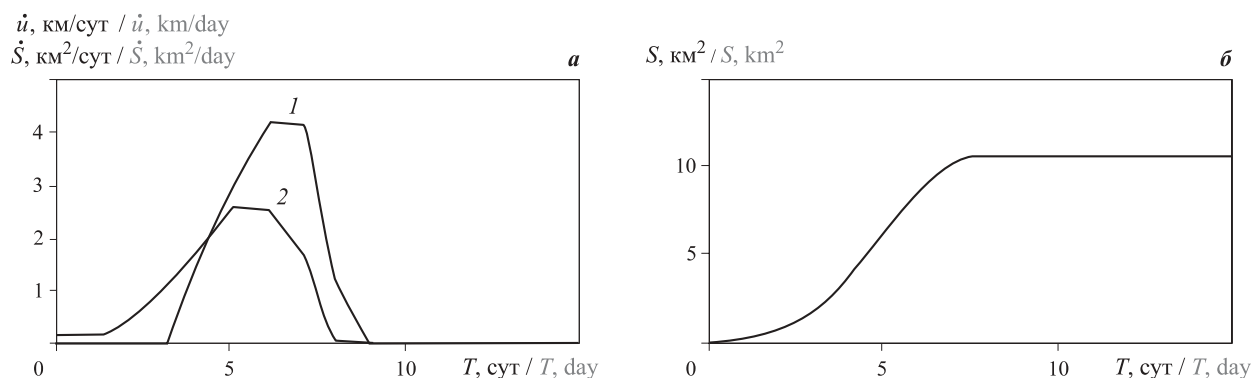
Если же для данных экспертных оценок возможной интенсивности пожара и времени его тушения не будут обеспечены рекомендуемые темпы возведения заградительной полосы и  $\dot{u}_{\max}$  реализовать будет невозможно, то, естественно, эффективность тушения пожара снижается.

На рис. 9 представлены результаты ликвидации пожара при  $\dot{u}_{\max} = 5 \text{ км}/\text{сут}$ . Из рис. 9 следует, что в этом случае площадь выгоревшего леса превысит  $10 \text{ км}^2$ , а время его тушения составит 8–9 сут.



**Рис. 8.** Динамические характеристики тушения пожара с использованием алгоритма нечеткой логики при  $\dot{u}_{\max} = 7 \text{ км}/\text{сут}$ : а — динамические характеристики пожара (1 — темп создания заградительной полосы (управление)  $\dot{u}(t)$ , км/сут; 2 — темп изменения площади пожара  $\dot{S}(t)$ , км<sup>2</sup>/сут); б — изменение площади пожара

**Fig. 8.** Dynamic characteristics of fire extinguishing using the fuzzy logic algorithm, with  $\dot{u}_{\max} = 7 \text{ км}/\text{day}$ : а — dynamic characteristics of a fire (1 — rate of the creation of the barrage band (control)  $\dot{u}(t)$ , км/сут; 2 — rate of change of fire area  $\dot{S}(t)$ , км<sup>2</sup>/day); б — change of fire area



**Рис. 9.** Динамические характеристики тушения пожара с использованием алгоритма нечеткой логики при  $\dot{u}_{\max} = 5 \text{ км}/\text{сут}$ : а — динамические характеристики пожара (1 — темп создания заградительной полосы (управление)  $\dot{u}(t)$ , км/сут; 2 — темп изменения площади пожара  $\dot{S}(t)$ , км<sup>2</sup>/сут); б — изменение площади пожара

**Fig. 9.** Dynamic characteristics of fire extinguishing using the fuzzy logic algorithm with  $\dot{u}_{\max} = 5 \text{ км}/\text{day}$ : а — dynamic characteristics of a fire (1 — rate of the creation of the barrage band (control)  $\dot{u}(t)$ , км/сут; 2 — rate of change of fire area  $\dot{S}(t)$ , км<sup>2</sup>/day); б — change of fire area

### Заключение

Результаты численного эксперимента показали, что алгоритм управления тушением пожара с использованием аппарата нечеткого моделирования приводит к достаточно неплохим результатам. Нечеткое моделирование как инструмент может использоваться при анализе пожарной обстановки и выработке управляющих решений по ликвидации пожара. Эффективность применения результатов

нечеткого моделирования в значительной мере определяется компетентностью экспертов в выборе априорных характеристик пожара и точностью измерения площади пожара и скорости его распространения. При этом в программе, реализующей алгоритм нечеткого регулятора, используются текущие измерения параметров пожара, и в этом смысле она является вполне адаптивной к изменению состояния пожарной обстановки.

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Колпаков В. Ф. Один из подходов моделирования лесных пожаров с целью повышения эффективности их ликвидации // Безопасность жизнедеятельности. — 2011. — № 4. — С. 43–47.
2. Колпаков В. Ф. Синтез адаптивного алгоритма управления ликвидацией лесных пожаров // Пожаровзрывобезопасность. — 2013. — Т. 22, № 11. — С. 17–23.
3. Крутько П. Д. Обратные задачи динамики в теории автоматического управления. Цикл лекций : учебное пособие для вузов. — М. : Машиностроение, 2004. — 573 с.
4. Тетерин И. М., Топольский Н. Г., Прус Ю. В., Климовцов В. М. Системы поддержки принятия управленческих решений при тушении пожаров : монография / Под общ. ред. Н. Г. Топольского. — М. : Академия ГПС МЧС России, 2009. — 102 с.
5. Васильев В. И., Ильясов Б. Г. Интеллектуальные системы управления. Теория и практика : учебное пособие. — М. : Радиотехника, 2009. — 392 с.
6. Пегат А. Нечеткое моделирование и управление / Пер. с англ. — 2-е изд. — М. : БИНОМ. Лаборатория знаний, 2009. — 798 с.
7. Zadeh L. A. Fuzzy logic and the calculi of fuzzy rules and fuzzy graphs // Multiple-Valued Logic. — 1996. — Vol. 1. — P. 1–38.
8. Zadeh L. A. Toward a theory of fuzzy information granulation and its centrality in human reasoning and fuzzy logic // Fuzzy Sets and Systems. — 1997. — Vol. 90, Issue 2. — P. 111–127. DOI: 10.1016/S0165-0114(97)00077-8.
9. Tanaka K., Sugeno M. Stability analysis and design of fuzzy control systems // Fuzzy Sets and Systems. — 1992. — Vol. 45, Issue 2. — P. 135–156. DOI: 10.1016/0165-0114(92)90113-i.
10. Колпаков В. Ф. Параметрическая идентификация модели лесных пожаров // Безопасность жизнедеятельности. — 2012. — № 5. — С. 39–44.
11. Охорзин В. А. Прикладная математика в системе MATHCAD : учебное пособие. — 2-е изд., испр. и доп. — СПб. : Изд-во “Лань”, 2008. — 348 с.

*Материал поступил в редакцию 18 мая 2017 г.*

**Для цитирования:** Колпаков В. Ф. Применение нечеткого моделирования для информационной поддержки принятия решений при ликвидации лесных пожаров // Пожаровзрывобезопасность / Fire and Explosion Safety. — 2017. — Т. 26, № 7. — С. 65–73. DOI: 10.18322/PVB.2017.26.07.65-73.

English

## APPLICATION OF FUZZY MODELING FOR INFORMATION SUPPORT OF DECISION-MAKING IN EXTINGUISHING FOREST FIRES

**KOLPAKOV V. F.**, Candidate of Technical Sciences, Assistant Professor, Moscow State Psychological and Pedagogical University (Sretenka St., 29, Moscow, 127051, Russian Federation; e-mail: v.kolpakov53@mail.ru)

### ABSTRACT

Forest fires are uncontrolled burning of vegetation in forest territory. Its danger lies in its rapid and spontaneous spread, which is difficult to combat, and the consequences are long-term restoration of

flora and fauna in the territory where it happened, damage to the ecological, economic, material condition of the territory of the region, physical and psychological health of people. At the same time, the prevention and elimination of forest fires is very expensive. At the same time, an important task is to quickly and effectively eliminate the fire, planned so that the costs were minimal. Depending on the type of forest fire, it is important to make timely decisions on the liquidation of such natural disasters. Such solutions require considerable time, analysis of a large amount of information and can not always be called optimal.

Thus, it is urgent to create methods and tools to improve the quality of firefighting forces and facilities. At the same time, the efficiency of operational control under conditions of considerable uncertainty depends not only on the reliability of the information, but also on its qualitative analysis, and in conditions of limited time. The article deals with the mathematical support for more effective decision-making in the elimination of forest fires. As a tool of fuzzy modeling was selected based on the theory of fuzzy sets, fuzzy logic. The substantiation of this approach is presented. Briefly outlines the main provisions of the method of fuzzy modeling. As a control function were chosen pace of barrage bands at different stages of fire fighting. This control is formed as a function of measurement known area of fire and its propagation velocity. The efficiency and effectiveness of the algorithm of forming control function were confirmed by numerical simulations. In modeling, to simulate a real situation, the fire pattern in the form of non-linear differential equations, developed by the author of this article was used.

**Keywords:** forest fires; mathematical modeling; fuzzy modeling; fuzzy sets; expert assessments; control algorithm.

## REFERENCES

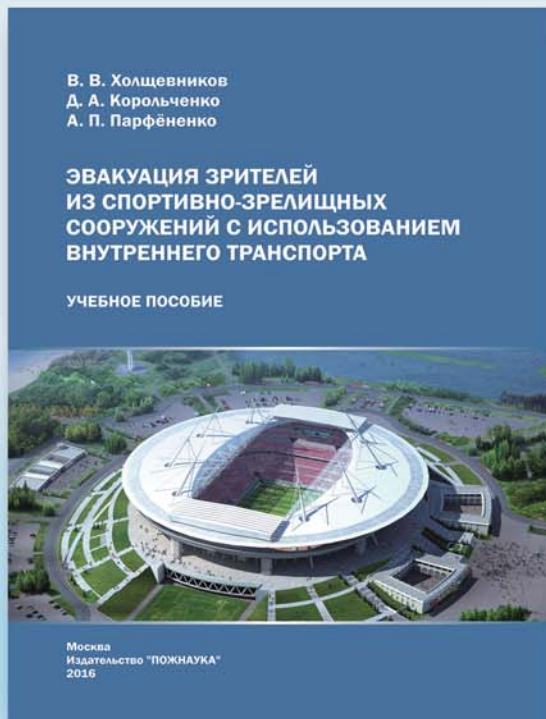
1. Kolpakov V. F. One approach modeling of forest fires in order to enhance their elimination. *Bezopasnost' zhiznedeatel'nosti / Life Safety*, 2011, no. 4, pp. 43–47 (in Russian).
2. Kolpakov V. F. Synthesis of the adaptive control algorithm liquidation of forest fires. *Pozharovzryvbezopasnost' / Fire and Explosion Safety*, 2013, p. 22, no. 11, pp. 17–23 (in Russian).
3. Krutko P. D. *Obratnyye zadachi dinamiki v teorii avtomaticheskogo upravleniya. Tsikl lektsiy* [The inverse dynamics problem in control theory. Lecture series]. Moscow, Mashinostroyeniye Publ., 2004. 573 p. (in Russian).
4. Teterin I. M., Topolskiy N. G. (ed.), Prus Yu. V., Klimovtsov V.M. *Sistemy podderzhki prinyatiya upravlencheskikh resheniy pri tushenii pozharov. Monografiya* [Systems to support the adoption of management decisions in extinguishing fires. Monograph]. Moscow, State Fire Academy of Emercom of Russia Publ., 2009. 102 p. (in Russian).
5. Vasilyev V. I., Ilyasov B. G. *Intellektualnyye sistemy upravleniya. Teoriya i praktika* [Intelligent control systems. Theory and practice]. Moscow, Radiotekhnika Publ., 2009. 392 p. (in Russian).
6. Andrzej Piegat. Fuzzy modeling and control. Heidelberg, New York, Physica-Verlag, 2001. 728 p. (Russ. ed.: Piegat A. Nechetkoye modelirovaniye i upravleniye. Moscow, BINOM. Laboratoriya znaniy Publ., 2009. 798 p.).
7. Zadeh L. A. Fuzzy logic and the calculi of fuzzy rules and fuzzy graphs. *Multiple-Valued Logic*, 1996, vol. 1, pp. 1–38.
8. Zadeh L. A. Toward a theory of fuzzy information granulation and its centrality in human reasoning and fuzzy logic. *Fuzzy Sets and Systems*, 1997, vol. 90, issue 2, pp. 111–127. DOI: 10.1016/S0165-0114(97)00077-8.
9. Tanaka K., Sugeno M. Stability analysis and design of fuzzy control systems. *Fuzzy Sets and Systems*. 1992, vol. 45, issue 2, pp. 135–156. DOI: 10.1016/0165-0114(92)90113-i.
10. Kolpakov V. F. Parametric identification of models of forest fires. *Bezopasnost' zhiznedeatel'nosti / Life Safety*, 2012, no. 5, pp. 39–44 (in Russian).
11. Okhorzin V. A. *Prikladnaya matematika v sisteme MATHCAD. 2-e izd.* [Applied mathematics for the MATHCAD. 2<sup>nd</sup> ed.]. Saint Petersburg, Lan Publ., 2008. 348 p. (in Russian).

**For citation:** Kolpakov V. F. Application of fuzzy modeling for information support of decision-making in extinguishing forest fires. *Pozharovzryvbezopasnost' / Fire and Explosion Safety*, 2017, vol. 26, no. 7, pp. 65–73 (in Russian). DOI: 10.18322/PVB.2017.26.07.65-73.



# ООО «Издательство «ПОЖНАУКА»

предлагает Вашему вниманию



Учебное пособие

Холщевников В. В., Корольченко Д. А., Парфёненко А. П.

## ЭВАКУАЦИЯ ЗРИТЕЛЕЙ ИЗ СПОРТИВНО-ЗРЕЛИЩНЫХ СООРУЖЕНИЙ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ВНУТРЕННЕГО ТРАНСПОРТА

М. : Изд-во «ПОЖНАУКА», 2016. — 88 с.

Впервые в практике архитектурно-строительного преподавания рассмотрена методология учета важнейшего функционального процесса — движения людских потоков с использованием эскалаторов и лифтовых установок при различных режимах эксплуатации зданий, включая чрезвычайную ситуацию пожара, на примере реального объекта с большим количеством находящихся в нем людей.

121352, г. Москва, а/я 43  
тел. (495)228-09-03  
e-mail: [mail@firepress.ru](mailto:mail@firepress.ru)

## УВАЖАЕМЫЕ ЧИТАТЕЛИ!

Информируем вас о том, что на сайте [http://www.gost.ru/wps/portal/pages/directions?WCM\\_GLOBAL\\_CONTEXT=/gost/GOSTRU/directions/Standardization/notifications/notificationsnationalstandards](http://www.gost.ru/wps/portal/pages/directions?WCM_GLOBAL_CONTEXT=/gost/GOSTRU/directions/Standardization/notifications/notificationsnationalstandards) опубликована первая редакция свода правил **“Здания и комплексы высотные. Требования пожарной безопасности”** (дата публикации: 12.07.2017; в строке “Поиск по базе” введите “Высотные здания”).

**Необходимость** разработки данного свода правил мотивирована тем, что СП 267.1325800.2016 “Здания и комплексы высотные. Правила проектирования”, введенный в действие с 1 июля 2017 г., в недостаточной степени учитывает требования федеральных законов № 123-ФЗ “Технический регламент о требованиях пожарной безопасности” (далее — ФЗ № 123) и № 384-ФЗ “Технический регламент о безопасности зданий и сооружений” (далее — ФЗ № 384), несмотря на то что СП 267.1325800.2016 разрабатывался с учетом требований ФЗ № 123 (см. разд. “Введение”).

**Цель** разработки данного СП (согласно пояснительной записке) — *“исключение необходимости разработки СТУ по обеспечению пожарной безопасности при проектировании и строительстве высотных зданий и комплексов”*.

Безопасность и противодействие терроризму стоит на первом месте в перечне приоритетных направлений развития науки, технологий и техники в Российской Федерации, утвержденном указом Президента Российской Федерации № 899.

Многочисленные примеры пожаров и взрывов в высотных зданиях различного назначения во всех

странах мира, в том числе в России, делают актуальной проблему **защиты людей** в таких чрезвычайных ситуациях и определяют необходимость обеспечения низкого уровня индивидуального пожарного риска для людей различного возраста и с разнообразными физическими и психофизиологическими возможностями, составляющих основной контингент в зданиях многофункциональных высотных комплексов. Существующие же **автоматические системы противопожарной защиты и пожаротушения не обеспечивают требуемой надежности и эффективности функционирования** таких зданий ( $K = 0,9 \div 0,8$  согласно “Методике определения расчетных величин пожарного риска в зданиях, сооружениях и строениях различных классов функциональной пожарной опасности”) и нераспространения опасных факторов пожара за пределы очага горения (ст. 8 п. 2 ФЗ № 384, ст. 59 ФЗ № 123).

Исходя из изложенного, редакция журнала приняла решение о публикации материалов, посвященных оценке и обсуждению редакций разрабатываемого свода правил.



**ВОПРОС:**

В советские годы алюминий активно использовался при монтаже электрических сетей. В последние годы при реконструкции зданий и сооружений различного назначения алюминиевые провода постепенно заменяются на медные. Считается, что причиной такой замены является высокая хрупкость алюминия при изгибах, низкая механическая прочность при разрыве, а также его способность окисляться на воздухе с образованием защитной пленки, обладающей большим электрическим сопротивлением.

Почему же в настоящее время медные проводники предпочтительнее алюминиевых и во всех ли случаях следует выполнять такую замену?

**ОТВЕТ\*:**

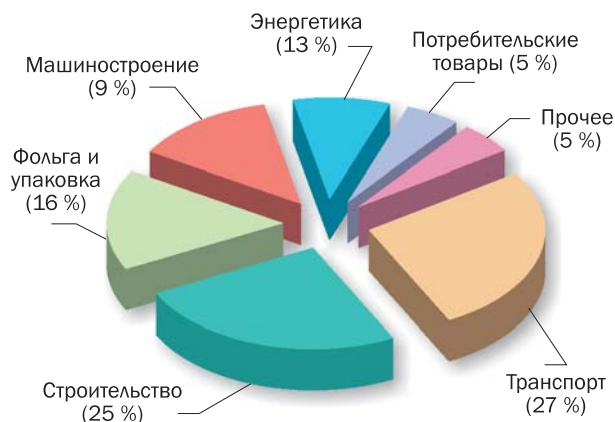
С каждым годом границы потребления алюминия в различных отраслях промышленности расширяются. Это объясняется тенденцией применения для конструирования современных зданий и сооружений более дешевых, надежных и легких материалов. Согласно статистике по потреблению алюминия в России второе место занимает такая отрасль, как строительство (см. рисунок). Помимо использования алюминия в качестве строительного материала, анализируется экономическая целесообразность применения этого металла в качестве электропроводки в жилых и общественных зданиях.

Правила устройства электроустановок (ПУЭ) [1] разрешают применять алюминиевую проводку только большого сечения (не менее 16 мм<sup>2</sup>), что в значительной мере затрудняет ее прокладку и монтаж. В то же время алюминиевые провода обладают меньшим весом и более низкой ценой по сравнению с медными, поэтому их применение в качестве кабельной продукции создает определенные перспективы.

В связи с высокой пожарной опасностью алюминиевых проводов и низкой прочностью Минэнерго России рассматривает возможность применения инновационных алюминиевых сплавов для производства современной кабельной продукции при соблюдении определенных условий [2]. Для этого необходимо научное обоснование применения такой продукции с проведением ряда экспериментов и последующим заключением профильных экспертных организаций, таких как ВНИИ КП, ВНИИПО и т. п.

Подготовлен проект приказа Минэнерго России “О внесении изменений в Правила устройства электроустановок в части использования кабельно-проводниковой продукции из алюминиевых сплавов” [3]

\* Окончание (часть 2). Начало см. в журнале “Пожаровзрывобезопасность” № 6 за 2017 г.



Потребление алюминия по отраслям

взамен п. 7.1.34 ПУЭ [1]. В настоящее время текст данного документа [3] под рабочим названием “Правила безопасности энергопринимающих установок. Особенности выполнения электропроводки в зданиях с токопроводящими медными жилами или жилами из алюминиевых сплавов”, представленный на сайте федерального портала проектов нормативных правовых актов (<http://regulation.gov.ru/projects#npa=49614>), проходит стадию общественного обсуждения.

В прил. 2 к Правилам [3] определены минимальные сечения медных проводников и проводников из алюминиевых сплавов для прокладки электропроводки в жилых зданиях (табл. 1). Минимальные сечения для медных проводов, указанных в прил. 2 Правил [3], аналогичны сечениям, приведенным в п. 7.1.34 [1].

В Правилах [3] также указано, что в качестве проводников должны использоваться сплавы электротехнического назначения серии 8000. Данная серия алюминиевых сплавов впервые появилась в США в 70-е годы. Первый сплав получил название “Stabloy” и был зарегистрирован под номером 8030. Он обладает улучшенными прочностными свойствами при сохранении высокой пластичности. Такие показатели достигнуты за счет увеличенного содержания

**Таблица 1. Наименьшие допустимые сечения кабелей и проводов электрических сетей в жилых зданиях**

| Вид линий                                                    | Наименьшее сечение, мм <sup>2</sup> , кабелей и проводов |                             |
|--------------------------------------------------------------|----------------------------------------------------------|-----------------------------|
|                                                              | с медными жилами                                         | с жилами из сплава алюминия |
| Линии групповых сетей                                        | 1,5                                                      | 2,5                         |
| Линии от этажных до квартирных щитов и к расчетному счетчику | 2,5                                                      | 4,0                         |
| Линии распределительной сети (стояки) для питания квартир    | 4,0                                                      | 6,0                         |

**Таблица 2. Требования к химическому составу алюминиевых сплавов серии 8000**

| Сплав | Содержание компонента, % от общей массы сплава |                   |                       |           |           |      |            | Прочие            |       |
|-------|------------------------------------------------|-------------------|-----------------------|-----------|-----------|------|------------|-------------------|-------|
|       | Алюминий                                       | Кремний           | Железо                | Медь      | Магний    | Цинк | Бор        | Каждый            | Всего |
| 8017  | Остаток                                        | 0,10              | 0,55–0,8              | 0,10–0,20 | 0,01–0,05 | 0,05 | 0,04       | 0,03 <sup>A</sup> | 0,10  |
| 8030  |                                                | 0,10              | 0,30–0,8              | 0,15–0,30 | 0,05      | 0,05 | 0,001–0,04 | 0,03              | 0,10  |
| 8076  |                                                | 0,10              | 0,6–0,9               | 0,04      | 0,08–0,22 | 0,05 | 0,04       | 0,03              | 0,10  |
| 8130  |                                                | 0,15 <sup>B</sup> | 0,40–1,0 <sup>B</sup> | 0,05–0,15 | –         | 0,10 | –          | 0,03              | 0,10  |
| 8176  |                                                | 0,03–0,15         | 0,40–1,0              | –         | –         | 0,10 | –          | 0,05 <sup>C</sup> | 0,15  |
| 8177  |                                                | 0,10              | 0,25–0,45             | 0,04      | 0,04–0,12 | 0,05 | 0,04       | 0,03              | 0,10  |

<sup>A</sup> Литий максимум 0,003 %.

<sup>B</sup> Кремний и железо максимум 1,0 %.

<sup>C</sup> Галлий максимум 0,03 %.

железа (до 0,8 %) и меди (до 0,3 %). Железо исключает склонность алюминия к повышенной текучести (ползучести) и обеспечивает высокую прочность после термической обработки (отжиг), а медь улучшает прочностные свойства сплава при повышенных температурах.

Кроме алюминиевого сплава 8030, разработаны и могут использоваться в качестве электрических проводников иные сплавы серии 8000, которые представлены в американском стандарте ASTM B 800 (2015) [4]. В нем насчитывается шесть сплавов различного состава (табл. 2), из которых допускается изготавливать проводники с сечением жил от 2 до 107 мм<sup>2</sup>.

Алюминиевые сплавы серии 8000 представлены и в европейском стандарте EN 573-3 [5], который принят в качестве национального стандарта многими странами Евросоюза. Согласно этому стандарту [5] для изготовления электропроводки могут использоваться не все виды сплавов серии 8000, а только марок 8030 и 8176 (см. табл. А.8, прил. А [5]).

Из представленной выше информации можно сделать вывод о том, что, наряду с медными проводниками, зарубежные страны активно внедряют в электромонтажную практику проводники из алюминиевых сплавов серии 8000, которые обладают большей прочностью и эластичностью по сравнению с используемыми в России (международное обозначение 1350, 1370 и др.).

Так как алюминиевые сплавы серии 8000 окисляются практически так же, как чистый алюминий, проблема надежности и пожарной безопасности контактных соединений на сегодняшний день остается по-прежнему актуальной.

В связи с этим объединенная компания «РУСАЛ» совместно с ВНИИ КП и ФГБУ ВНИИ ПО МЧС России занимается анализом и испытаниями различных контактных соединений для алюминиевых проводни-

ков. По результатам исследований будет определена возможность безопасного использования таких соединений на практике при монтаже проводников в зданиях и сооружениях.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Правила устройства электроустановок (ПУЭ). — 6-е изд. — М.: Энергоатомиздат, 1986.
2. Российская газета № 33(6901) от 17.02.2016. URL: <https://rg.ru/2016/02/16/aliuminievaia-elektroprovodka-vernestsia-v-stroitelstvo.html> (дата обращения: 20.06.2017).
3. Правила безопасности энергопринимающих установок. Особенности выполнения электропроводки в зданиях с токопроводящими медными жилами или жилами из алюминиевых сплавов (проект) / Подготовлен Минэнерго России 21.10.2016. URL: <http://www.garant.ru/products/ipo/prime/doc/56587441/> (дата обращения: 20.06.2017).
4. ASTM B800-05. Standard Specification for 8000 Series Aluminum Alloy Wire for Electrical Purposes — Annealed and Intermediate Tempers (Стандарт по спецификации электрических проводов из алюминиевого сплава 8000 серии обожженных и промежуточной закалки). — American Society for Testing and Materials. Current edition Oct. 1, 2015.
5. DIN EN 573-3:2013. Aluminium and aluminium alloys — Chemical composition and form of wrought products. Part 3: Chemical composition and form of products, German version (Алюминий и алюминиевые сплавы — Химический состав и форма выделанных продуктов. Часть 3: Химический состав и форма продуктов, Немецкая версия). — American Society for Testing and Materials. Current edition Dec. 1, 2013.

Ответ подготовили сотрудники кафедры специальной электротехники, автоматизированных систем и связи Академии ГПС МЧС России: канд. техн. наук, профессор, академик НАНПБ **В. Н. ЧЕРКАСОВ**; старший преподаватель **А. С. ХАРЛАМЕНКОВ** (e-mail: [h\\_a\\_s@live.ru](mailto:h_a_s@live.ru))

## ПРАВИЛА ДЛЯ АВТОРОВ!

Направляемые в журнал “ПОЖАРОВЗРЫВОБЕЗОПАСНОСТЬ” 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 в редакцию в электронном виде 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 электронный адрес всех или хотя бы одного из авторов. При этом не следует приводить составные части названий организаций, обозначающие принадлежность ве-

домству, форму собственности, статус организации (например, “Учреждение Российской академии наук...”, “Федеральное государственное унитарное предприятие...”, “ФГОУ ВПО...” и т. п.), так как это затрудняет идентификацию организации. 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).*

**2.4.** Аннотация на русском языке должна состоять не менее чем из 5–7 предложений и не должна содержать обобщенные данные по выбранной в статье теме. Аннотация к научной статье представляет собой краткое описание содержания изложенного текста (т. е.: “Изучены..., проанализированы..., представлены...” и т. п.).

**2.5.** 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);
- оригинальным (не быть калькой с русскоязычной аннотации с дословным переводом);
- 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 250–300 слов.

Структура резюме должна повторять структуру статьи и включать введение, цели и задачи, методы, результаты, заключение (выводы).

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

Выводы могут сопровождаться рекомендациями, оценками, предположениями, гипотезами, описанными в работе.

Текст должен быть связным; излагаемые положения должны логично вытекать одно из другого.

Сокращения и условные обозначения, кроме общепотребительных, следует применять в исключительных случаях или давать их расшифровку и определение при первом упоминании в тексте резюме.

В авторское резюме не рекомендуется 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.

**2.6.** Ключевые слова на русском и английском языках (не менее 5 слов или 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. 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.

**2.7.** 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.

Для двуязычного представления табличного и графического материала необходимо прислать перевод на английский язык:

- для таблицы: ее названия, шапки, боковика, текста во всех строках, сносок и примечаний;
- для рисунка: подрисунковой подписи и всех текстовых надписей на самом рисунке;
- для схемы: подписи к ней и всего содержания самой схемы.

**2.8. 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 10 источников (в это число не входят нормативные документы, патенты и т. п.), в том числе не менее 3 иностранных. Выполнение данного требования будет свидетельствовать о том, что авторы используют предыдущие научные достижения в необходимой мере.

Не менее половины источников должны быть включены 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 науч-

ной специальности или группе специальностей. Для поиска рекомендуется использовать ресурс <http://www.disscat.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 (ФИО 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.

**2.9. References** (пристайные списки литературы на английском языке). Представление в References только транслитерированного (без перевода) описания недопустимо. Обращаем Ваше внимание, что перевод названия статьи 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:

- авторы (транслитерация; для ее написания используйте сайт <http://fotosav.ru/services/transliteration.aspx>, обязательно включив в настройках справа вверх 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:* Sokolov D. N., Vogman L. P., Zuykov V. A. 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.** К статьям следует прилагать рецензию стороннего специалиста (т. е. он не должен быть связан с местом работы (учебы) авторов статьи), которая должна быть подписана рецензентом (с указанием его Ф. И. О., ученого звания, ученой степени, должности, места работы), заверена отделом кадров (ученым секретарем) и печатью. Все рецензенты должны являться признанными специалистами по тематике рецензируемых материалов и иметь в течение последних 3 лет публикации по тематике рецензируемой статьи. Обращаем Ваше внимание, что рецензент не должен входить в Редакционный совет нашего журнала.

**4.** Статьи, присланные не в полном объеме, на рассмотрение не принимаются.

**5.** В случае получения замечаний в ходе внутреннего рецензирования статьи авторы должны предоставить доработанный вариант текста 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.

**6.** 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”, согласны с условиями публикации или отклонения рукописи, а также с правилами ее оформления!

ISSN 0869-7493

Продолжается  
подписка  
на журнал

# 2017

## ПОЖАРОВЗРЫВО- БЕЗОПАСНОСТЬ



По вопросам подписки  
просьба обращаться  
по тел.: (495) 228-09-03,  
8-909-940-01-85 или  
по e-mail [info@fire-smi.ru](mailto:info@fire-smi.ru)

- Стоимость подписки на 2-е полугодие 2017 г. (6 номеров) — 6840 руб.
- Стоимость годовой подписки (12 номеров) — 13680 руб.

### ВНИМАНИЕ! АКЦИЯ!

При оформлении подписки на 2-е полугодие 2017 г. через редакцию Вы получаете в ПОДАРОК наш журнал номера с 1-го по 6-й текущего года !!!

У Вас также есть возможность получить годовой комплект (12 номеров) журнала «Пожаровзрывобезопасность / Fire and Explosion Safety» за 2016 г. по цене ВСЕГО 1000 рублей\*.

\* Доставка осуществляется за счет покупателя согласно тарифам почты РФ.



# ИНСТИТУТ КОМПЛЕКСНОЙ БЕЗОПАСНОСТИ В СТРОИТЕЛЬСТВЕ

Национальный исследовательский  
Московский государственный  
строительный университет

Научно-  
исследовательские  
и сертификационные  
испытания:

- ♦ железобетонных конструкций
- ♦ противопожарных преград
- ♦ легкосбрасываемых конструкций
- ♦ фасадных систем
- ♦ палуб, переборок

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)

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.