

5-2017

ПОЖ Издательство
НАУКА

ПОЖАРОВЗРЫВО-

БЕЗОПАСНОСТЬ



НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКИЙ ЖУРНАЛ

ISSN 0869-7493

ЗАВИСИМОСТИ
МЕЖДУ ПАРАМЕТРАМИ
ЛЮДСКИХ ПОТОКОВ
ПРИ ЭВАКУАЦИИ ИЗ МЕЧЕТЕЙ

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. 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" 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 15.05.2017.
Выход в свет 25.05.2017.
Формат 60х84 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

ОБЩИЕ ВОПРОСЫ ПОЖАРНОЙ БЕЗОПАСНОСТИ

КАМЕНЕЦКАЯ Н. В., МЕДВЕДЕВА О. М.,
ХИТОВ С. Б., БАРДУЛИН Е. Н.
Обоснование выбора эффективных тактических
приемов по тушению пожаров и проведению
аварийно-спасательных работ методом
последовательного анализа

5

ПРОЦЕССЫ ГОРЕНИЯ И ВЗРЫВА

ГОРЕВ В. А., САЛЫМОВА Е. Ю.
О возможности вибрационного горения
при внутренних взрывах

13

ПОЖАРОВЗРЫВООПАСНОСТЬ ВЕЩЕСТВ И МАТЕРИАЛОВ

БАТОВ Д. В., СТОРОНКИНА О. Е., МОЧАЛОВА Т. А.
Модификация аддитивно-группового метода
для описания показателей пожарной опасности
предельных углеводородов: температур вспышки
и самовоспламенения, энтальпии испарения

21

ОГНЕЗАЩИТА

ПОКРОВСКАЯ Е. Н., ПОРТНОВ Ф. А.
Термодинамическая оптимизация модификаторов
поверхностного слоя древесины

29

ОГНЕСТОЙКОСТЬ СТРОИТЕЛЬНЫХ КОНСТРУКЦИЙ

ГОЛОВАНОВ В. И., НОВИКОВ Н. С.,
ПАВЛОВ В. В., КУЗНЕЦОВА Е. В.
Прочностные и теплофизические свойства бетона
с полипропиленовой фиброй в условиях
температурного режима стандартного пожара

37

ПОЖАРНАЯ БЕЗОПАСНОСТЬ ЗДАНИЙ, СООРУЖЕНИЙ, ОБЪЕКТОВ

ПРИСАДКОВ В. И., ЕРЕМИНА Т. Ю., ТИХОНОВА Н. В.
Предпосылки разработки свода правил
"Противопожарная защита объектов
культурного наследия"

45

БЕЗОПАСНОСТЬ ЛЮДЕЙ ПРИ ПОЖАРАХ

ХОЛЩЕВНИКОВ В. В.,
САМОШИН Д. А., ШАХУОВ Т. Ж.
Зависимости между параметрами
людских потоков при эвакуации из мечетей

54

ДИСКУССИИ

ТАРАНЦЕВ А. А.
О применимости перколяционного метода
моделирования развития пожара
на открытых территориях

66

ВОПРОС – ОТВЕТ

69

CONTENTS

GENERAL QUESTIONS OF FIRE SAFETY

KAMENETSKAYA N. V., MEDVEDEVA O. M.,
KHITOV S. B., BARDULIN E. N.
Justification of effective tactical procedure
choice fire-fighting wrecking
by means of sequential
analysis method

COMBUSTION AND EXPLOSION PROCESSES

GOREV V. A., SALYMOVA E. Yu.
About the possibility of vibration combustion
at internal explosions

FIRE-AND-EXPLOSION HAZARD OF SUBSTANCES AND MATERIALS

BATOV D. V., STORONKINA O. E., MOCHALOVA T. A.
Modification of the additive-group method to describe
the fire hazard indicators of paraffin hydrocarbons:
flash point and spontaneous ignition temperature,
vaporation enthalpy

FIRE RETARDANCE

POKROVSKAYA E. N., PORTNOV F. A.
Thermodynamic optimization of modifiers
of the surface layer of wood

FIRE-RESISTANCE OF BUILDING CONSTRUCTIONS

GOLOVANOV V. I., NOVIKOV N. S.,
PAVLOV V. V., KUZNETSOVA E. V.
Strength and thermo-physical properties
of concrete with polypropylene fiber under
standard temperature regimes

FIRE SAFETY OF BUILDINGS, STRUCTURES, OBJECTS

PRISADKOV V. I., EREMINA T. Yu., TIKHONOVA N. V.
Development basis for code of practice
"Fire protection of cultural heritage
objects"

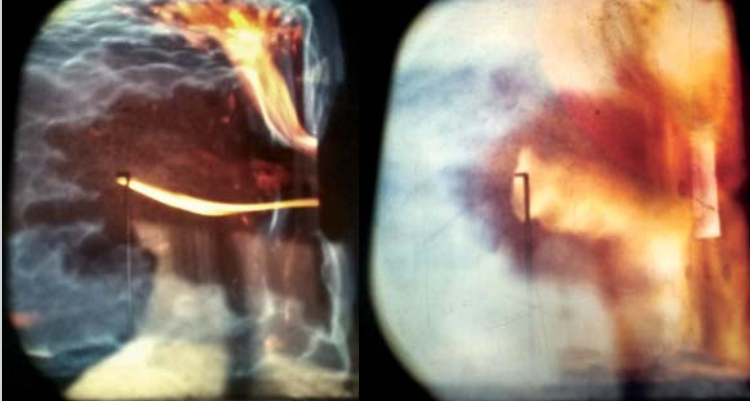
FIRE SAFETY OF PEOPLE

KHOLSHCHEVNIKOV V. V.,
SAMOSHIN D. A., SHAKHUOV T. Zh.
Dependences between the parameters
of human flows during evacuation from mosques

DISCUSSION

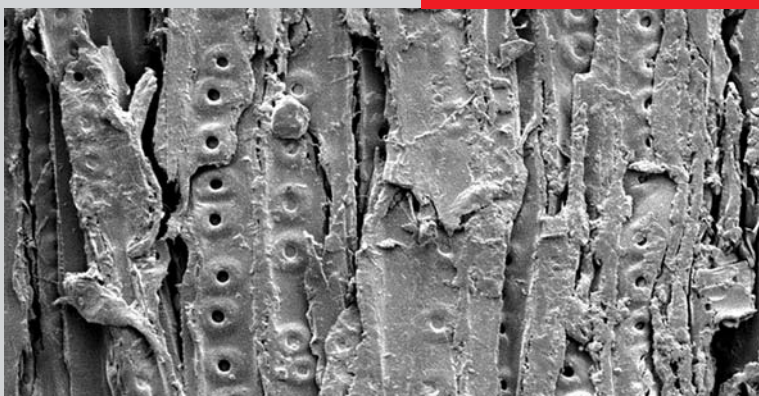
TARANTSEV A. A.
On the applicability of the percolation
modeling method of fire development
on open territories

QUESTION – ANSWER



О возможности вибрационного горения при внутренних взрывах

Стр. 13



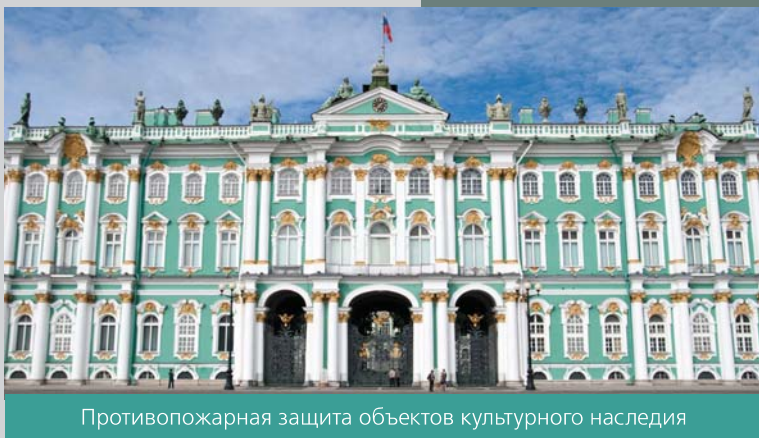
Термодинамическая оптимизация модификаторов древесины

Стр. 29



Прочностные и теплофизические свойства фибробетона

Стр. 37



Противопожарная защита объектов культурного наследия

Стр. 45

Стр. 54



Параметры людских потоков при эвакуации из мечетей



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, mail@firepress.ru;
www.fire-smi.ru, 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. 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 15.05.2017.

Date of publication 25.05.2017.

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)

Н. В. КАМЕНЕЦКАЯ, канд. техн. наук, профессор кафедры высшей математики и системного моделирования сложных процессов, Санкт-Петербургский университет ГПС МЧС России (Россия, 196105, г. Санкт-Петербург, Московский просп., 149; e-mail: natkam53@mail.ru)

О. М. МЕДВЕДЕВА, канд. техн. наук, доцент кафедры высшей математики и системного моделирования сложных процессов, Санкт-Петербургский университет ГПС МЧС России (Россия, 196105, г. Санкт-Петербург, Московский просп., 149; e-mail: mom65@mail.ru)

С. Б. ХИТОВ, преподаватель кафедры высшей математики и системного моделирования сложных процессов, Санкт-Петербургский университет ГПС МЧС России (Россия, 196105, г. Санкт-Петербург, Московский просп., 149; e-mail: khitoff_s@mail.ru)

Е. Н. БАРДУЛИН, канд. экон. наук, профессор, начальник кафедры управления и интегрированных маркетинговых коммуникаций, Санкт-Петербургский университет ГПС МЧС России (Россия, 196105, г. Санкт-Петербург, Московский просп., 149; e-mail: uiimk@mail.ru)

УДК 614.849

ОБОСНОВАНИЕ ВЫБОРА ЭФФЕКТИВНЫХ ТАКТИЧЕСКИХ ПРИЕМОВ ПО ТУШЕНИЮ ПОЖАРОВ И ПРОВЕДЕНИЮ АВАРИЙНО-СПАСАТЕЛЬНЫХ РАБОТ МЕТОДОМ ПОСЛЕДОВАТЕЛЬНОГО АНАЛИЗА

Рассмотрена возможность математического моделирования процесса проверки на соответствие заданным нормативным требованиям новых тактических приемов действий пожарно-спасательных подразделений Федеральной противопожарной службы (ФПС) МЧС России по тушению пожаров. Предложена методика выработки решения о целесообразности принятия на вооружение нового тактического приема, основанная на методе последовательного анализа. С помощью классических положений теории вероятностей и математической статистики подтверждены формулы, положенные в основу метода. Приведен пример его практической реализации. Сформулированы рекомендации по использованию метода при решении других задач оперативной деятельности МЧС России.

Ключевые слова: математическое моделирование; последовательный анализ; проверка статистических гипотез; оценка качества тактических приемов действий сил; пожарно-спасательные подразделения.

DOI: 10.18322/PVB.2017.26.05.5-12

Введение

Одним из основных направлений, способствующих решению поставленных перед пожарно-спасательными подразделениями (ПСП) ФПС МЧС России задач, является разработка новых тактических приемов (далее — ТП) ведения оперативных действий на пожарах и при ликвидации последствий чрезвычайных ситуаций (ЧС).

Несомненно, принятию на вооружение новых тактических приемов действий сил пожарно-спасательных подразделений должен предшествовать ряд экспериментов (учений), доказывающих их более высокую эффективность (по заданным критериям) по сравнению с существующими.

Однако проведение натурных экспериментов для испытания новых образцов дорогостоящей техники, вооружения, материалов, средств индивидуаль-

ной защиты, тактических приемов действий ПСП в различных опасных ситуациях требует больших затрат сил, средств и времени. Кроме того, эксперимент невозможен в тех случаях, когда он связан с угрозой для жизни или здоровья людей.

Очевидно, что исследование перечисленных процессов и объектов невозможно без применения математического моделирования, эффективность использования которого в различных сферах прикладной науки уже неоднократно подтверждалась [1–6].

Цели и задачи исследования

Рассмотрим возможность математического моделирования процесса выработки научно обоснованного решения о принятии на вооружение нового тактического приема на основе проверки его соответствия требованиям по эффективности.

Подобные исследования предполагают знание соответствующей вероятностной характеристики [7]. Однако на практике, как правило, требуемая вероятностная характеристика неизвестна, и для нее может быть получена только статистическая оценка, которая будет тем точнее и надежнее, чем больше число проведенных испытаний.

С учетом имеющихся ограничений на затраты сил, материальных средств, ресурсов и времени, необходимых для получения требуемой статистической оценки, возникает задача обеспечения ее достаточно высокой точности и надежности при сравнительно небольшом числе испытаний.

Принимая во внимание все перечисленные условия, рассмотрим задачу выработки решения о целесообразности принятия на вооружение вновь разработанного ТП при ограниченном числе учений (опытных данных).

Методы исследования

Воспользуемся методом, при котором число наблюдений (в отличие от других статистических методов) заранее не определяют, а решение об окончании эксперимента по проверке разработанного тактического приема принимают по результатам каждого этапа эксперимента (учения). Таким образом, каждый последующий опыт (учение) следует проводить лишь после того, как анализ полученных до него результатов покажет необходимость продолжения экспериментов. Такой метод математической статистики называется методом последовательного анализа (МПА), создателем которого является А. Вальд [8].

Основное достоинство МПА по сравнению с классическими методами математической статистики заключается в том, что он требует значительно меньшего числа наблюдений, что при указанных выше условиях и ограничениях дает возможность принимать гарантированное научно обоснованное управленческое решение.

Формирование решения о целесообразности принятия на вооружение нового ТП с помощью МПА

В методе последовательного анализа формулируются две статистические гипотезы — в нашем случае о соответствии (H_0) и несоответствии (H_1) нового ТП нормативным требованиям по эффективности.

Постановка задачи. На основании анализа оперативной деятельности ПСП разработан новый тактический прием ведения действий по тушению пожаров и проведению аварийно-спасательных работ (ликвидации последствий ЧС).

Определяются требования, которым должен отвечать новый ТП [9]. Например, задаются вероят-

ность ликвидации пожара за нормативное время или математическое ожидание максимального предотвращенного материального ущерба, наносимого ЧС (пожаром), которые должны быть не меньше заданной величины. Для оценки эффективности нового ТП требуется проверка его на учениях (испытаниях). Необходимо на основании ограниченного числа таких учений с применением МПА принять решение о целесообразности принятия нового ТП на вооружение.

В качестве вероятностной характеристики и критерия эффективности примем вероятность того, что пожар будет потушен за время, не превышающее установленное:

$$P(t_{\text{тп}} \leq t_{\text{уст}}) = W \geq P_{\text{уст}}$$

где $P_{\text{уст}}$ — наименьшее допустимое в рассматриваемых условиях оперативной обстановки значение вероятности выполнения задачи при реализации исследуемого ТП;

$t_{\text{тп}}$ — время тушения пожара при использовании исследуемого ТП;

$t_{\text{уст}}$ — предельное время тушения пожара, установленное экспертами;

W — критерий эффективности ТП.

Иначе говоря, будем считать ТП целесообразным, если ему соответствует вероятность выполнения задачи $W \geq P_{\text{уст}}$, и нецелесообразным, если $W < P_{\text{уст}}$.

Заметим, что определение установленного времени тушения пожара не входит в задачу данного исследования; оно может быть задано, например, на основании статистических данных, полученных при изучении процессов тушения реальных пожаров [10].

Как уже отмечалось выше, число необходимых наблюдений заранее не устанавливается. Результаты каждого из учений последовательно анализируются, и на основании анализа рекомендуется одно из трех решений:

- 1) считать ТП эффективным по заданному критерию и принять его на вооружение (реализация гипотезы H_0);
- 2) отклонить ТП, считать его непригодным для выполнения поставленной задачи (реализация гипотезы H_1);
- 3) провести еще одно испытание, так как полученной информации недостаточно для того, чтобы принять либо отвергнуть гипотезу H_0 или H_1 .

Если принимается первое или второе решение, то эксперимент заканчивается, если же третье, то он продолжается. Таким образом, количество испытаний является случайной величиной.

Для вывода формул, позволяющих осуществить статистическую оценку исследуемой вероятностной

характеристики и получить ее граничные значения, рассмотрим условный процесс последовательного анализа при проверке тактического приема на соответствие предъявляемым требованиям [8, 11].

На основании опыта, условий, а также нормативных требований к ТП устанавливается некоторое пороговое значение вероятности p' того, что ТП может быть непригодным. Если при этом окажется, что истинное значение доли неудачных испытаний исследуемого ТП p меньше p' , то делается вывод, что ТП соответствует предъявляемым требованиям, является эффективным и может быть поставлен на вооружение (принимается гипотеза H_0). При $p > p'$ ТП следует считать непригодным для выполнения поставленной задачи по ликвидации пожаров.

В условиях неопределенности относительно точного знания вероятности, что ТП будет неэффективным, допускается возможность совершения ошибки. Не исключено, что может быть принято решение об отклонении эффективного ТП или о принятии ТП, не соответствующего требованиям. Ошибки в рекомендации принять или отклонить ТП тем более существенны, чем значительно отличается установленное пороговое значение p' от точного значения p . Если эти величины близки ($p \approx p'$), то ошибки не критичны.

Таким образом, вокруг порогового значения p' создается некоторая зона безразличия к указанным ошибкам [8, 11]. Установим нижнюю и верхнюю границы зоны, за пределами которой такие ошибки недопустимы, в виде вероятностей p_0 и p_1 , причем $p_0 < p', p_1 > p'$.

Тогда можно выделить три зоны относительно порогового значения вероятности (рис. 1):

- зону принятия ТП, $p' \leq p_0$;
- зону отклонения ТП, $p' \geq p_1$;
- зону безразличия (неопределенности), $p_0 < p' < p_1$.

Считается, что допущена ошибка первого рода, если отвергнута верная гипотеза H_0 , т. е. в условиях нашей задачи не принят ТП, отвечающий требованиям, при малой доле неудачных учений ($p \leq p_0$), а также ошибка второго рода, т. е. принята неверная гипотеза H_0 , а значит, принят непригодный ТП при $p \geq p_1$.

В каждой задаче проверки статистических гипотез устанавливаются допустимые вероятности α и β совершения ошибки первого и второго рода со-

ответственно в зависимости от тяжести их последствий. При решении каждой практической задачи числовые значения α и β , а также p_0 и p_1 следует устанавливать используя опыт прежних наблюдений и условия проведения конкретных испытаний.

Тогда допускаемый риск определяется величинами p_0 , p_1 , α и β . Если они заданы, то при испытании ТП необходимо потребовать, чтобы вероятность посчитать его непригодным при $p \leq p_0$ была не больше α , а вероятность рекомендовать ТП к применению при $p \geq p_1$ была не больше β . Тогда граничные условия можно сформулировать так: вероятность забраковать ТП при $p = p_0$ равна α , а вероятность считать целесообразным принять ТП при $p = p_1$ равна β .

Для ошибки первого рода стандартными считаются значения $\alpha = 0,005; 0,01; 0,05; 0,10$, хотя можно выбрать и любое другое. В технических исследованиях чаще всего принимают $\alpha = 0,05$, а в исследованиях, тесно связанных с риском для жизни и здоровья людей, — $\alpha = 0,01$.

В рамках поставленной выше задачи ТП считается эффективным для тушения пожаров, если процент (доля) учений с неудачным результатом p не превышает p_0 , и неэффективным, если p не менее p_1 .

Цель моделирования — разработать рекомендации по принятию решения об эффективности или неэффективности ТП в ходе учений методом последовательного анализа.

Для разработки математической модели проверки нового ТП предположим, что проведено n учений, из которых m оказались с неудачным результатом и $(n - m)$ — с удачным [11, 12].

При доле неудачных учений p вероятность такого набора удачных и неудачных учений

$$P_n(p) = p^m (1 - p)^{n-m}. \quad (1)$$

Эта вероятность называется *функцией правдоподобия* гипотезы о том, что доля неудачных учений равна p .

Рассмотрим значения функции (1) на верхней и нижней границах зоны неопределенности: $P_n(p_1)$ и $P_n(p_0)$ — вероятности того, что при проверке n изделий ровно m из них будут бракованными, если $p = p_1$ и $p = p_0$ (см. рис. 1).

В качестве критерия последовательной проверки будем использовать *коэффициент правдоподобия* μ [11]:

$$\mu = \frac{P_n(p_1)}{P_n(p_0)}. \quad (2)$$

Коэффициент правдоподобия, таким образом, равен отношению вероятности реализации гипотезы H_1 к вероятности реализации гипотезы H_0 .

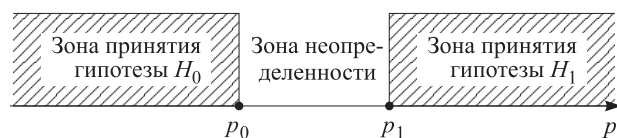


Рис. 1. Зоны возможных значений p относительно порогового значения вероятности p'



Рис. 2. Зоны значений коэффициента μ при проверке нового ТП

Чем больше величина μ , тем больше оснований признать тестируемый ТП неэффективным для успешного тушения пожаров. При малом μ новый ТП следует считать соответствующим нормативным требованиям и рекомендовать его для применения в оперативной деятельности пожарного подразделения. И в том, и в другом случае проверка прекращается. Если же коэффициент μ принимает некоторое промежуточное значение, то требуется проведение очередного учения.

Принцип последовательного анализа с вычислением коэффициента правдоподобия заключается в следующем (рис. 2) [8, 11]:

- при $\mu \geq A$ новый ТП отклоняют, как не отвечающий предъявляемым требованиям (верна гипотеза H_1);
- при $\mu \leq B$ новый ТП принимают (верна гипотеза H_0);
- при $B < \mu < A$ следует провести новое испытание.

Определим предельные значения A и B как функции от вероятностей совершить ошибки первого и второго рода.

Новый ТП отклоняется из-за того, что он не соответствует требованиям и не совершена ошибка второго рода с вероятностью $1 - \beta$ на верхней границе, либо из-за ошибки первого рода на нижней границе, вероятность которой равна α . В этом случае

$$\mu = \frac{1 - \beta}{\alpha} \geq A. \quad (3)$$

Новый ТП принимается, когда совершается ошибка второго рода на верхней границе с вероятностью β либо когда он соответствует требованиям, и при этом не совершена ошибка первого рода с вероятностью $1 - \alpha$. Тогда

$$\mu = \frac{\beta}{1 - \alpha} \leq B. \quad (4)$$

Проверку следует продолжить, если

$$\frac{\beta}{1 - \alpha} < \mu < \frac{1 - \beta}{\alpha}. \quad (5)$$

Таким образом, можно обозначить:

$$A = \frac{1 - \beta}{\alpha}; \quad B = \frac{\beta}{1 - \alpha}. \quad (6)$$

Определим зависимость числа m неудачных учений от случайного количества испытаний n и от величин p_0 , p_1 , α и β .

Обозначим: $q_1 = 1 - p_1$; $q_0 = 1 - p_0$.

Далее, используя формулы (1), (2) и (6), преобразуем неравенство (5):

$$\frac{\beta}{1 - \alpha} < \left(\frac{p_1}{p_0} \right)^m \left(\frac{q_1}{q_0} \right)^{n-m} < \frac{1 - \beta}{\alpha}. \quad (7)$$

Прологарифмируем неравенство (7), выполнив необходимые преобразования с использованием свойств логарифмов [8, 11, 12], и получим новое неравенство:

$$\begin{aligned} \frac{\ln \frac{\beta}{1 - \alpha}}{\ln \left(\frac{p_1}{p_0} \frac{q_0}{q_1} \right)} + n \frac{\ln \frac{q_0}{q_1}}{\ln \left(\frac{p_1}{p_0} \frac{q_0}{q_1} \right)} < m < \\ < \frac{\ln \frac{1 - \beta}{\alpha}}{\ln \left(\frac{p_1}{p_0} \frac{q_0}{q_1} \right)} + n \frac{\ln \frac{q_0}{q_1}}{\ln \left(\frac{p_1}{p_0} \frac{q_0}{q_1} \right)}. \end{aligned} \quad (8)$$

Введем обозначения:

$$\begin{aligned} a &= \frac{\ln \frac{1 - \beta}{\alpha}}{\ln \left(\frac{p_1}{p_0} \frac{q_0}{q_1} \right)}; \quad b = \frac{\ln \frac{\beta}{1 - \alpha}}{\ln \left(\frac{p_1}{p_0} \frac{q_0}{q_1} \right)}; \\ k &= \frac{\ln \frac{q_0}{q_1}}{\ln \left(\frac{p_1}{p_0} \frac{q_0}{q_1} \right)}. \end{aligned} \quad (9)$$

Тогда неравенство (8) можно записать в виде:

$$b + nk < m < a + nk. \quad (10)$$

Неравенство (10) позволяет сформировать рекомендации по принятию решения в ходе испытаний в зависимости от количества неудачных учений с применением нового ТП:

- 1) новый тактический прием отклонить, $m \geq a + nk$;
- 2) новый тактический прием принять, $m \leq b + nk$;
- 3) провести еще одно испытание, $b + nk < m < a + nk$.

Практическая реализация МПА при проверке нового ТП. Графическая интерпретация метода

Применение такой формы метода осуществляется благодаря построению специального графика до начала эксперимента [8, 11, 12]. С этой целью задают вначале значения W , p_0 , p_1 , α и β .

Например, считают, что ТП целесообразен, если ему соответствует вероятность выполнения задачи $W \geq 0,9$ и нецелесообразен при $W < 0,9$ [13].

Затем для определения зоны неопределенности и допустимого риска, связанного с неправильным решением, устанавливают следующие требования:

- решение о том, что ТП целесообразен при $W < 0,8$, должно приниматься с вероятностью не более 0,30;
- решение о том, что ТП нецелесообразен при $W > 0,96$, должно приниматься с вероятностью не более 0,05.

Исходя из этих условий рассчитывают p' , p_0 и p_1 при $\alpha = 0,05$ и $\beta = 0,3$:

$$p' = 1 - 0,9 = 0,1;$$

$$p_0 = 1 - 0,96 = 0,04;$$

$$p_1 = 1 - 0,8 = 0,2.$$

Затем по формулам (9) определяют значения a , b и k при указанных значениях p_0 , p_1 , α и β и строят две параллельные прямые, соответствующие уравнениям $m_0 = b + kn$ и $m_1 = a + kn$. Так как всегда $p_0 \leq p_1$, то $k < 1$, т. е. угол наклона прямых m_0 и m_1 к оси абсцисс меньше 45° .

Продemonстрируем, как пользоваться графиком на примере при $p_0 = 0,04$; $p_1 = 0,2$; $\alpha = 0,05$; $\beta = 0,3$.

В соответствии с формулами (9) $a = 1,47$; $b = -0,64$; $k = 0,10$.

Прямые $m_1 = 1,47 + 0,1n$ и $m_0 = -0,64 + 0,1n$ (рис. 3) отсекают на оси m отрезки $a = 1,47$ и $b = -0,64$ и образуют с положительным направлением оси абсцисс угол $5,7^\circ$. Точка пересечения прямой $m_0 = -0,64 + 0,1n$ с горизонтальной осью имеет координаты $(6,4; 0)$. Между параллельными прямыми m_0 и m_1 находится зона неопределенности. Таким образом, попадание точки $(n; m)$ в область, находящуюся левее и выше прямой m_1 , соответствует случаю, когда новый ТП необходимо отклонить, а правее и ниже прямой m_0 — когда необходимо его принять.

Далее начинается последовательная проверка. Пусть, например, первое учение с применением нового ТП прошло успешно, что соответствует точке с координатами $(1; 0)$, которая находится в зоне неопределенности. Следовательно, необходимо провести очередное учение. Предположим, во втором и третьем учениях ТП также соответствовал предъявляемым требованиям. Точки $(2; 0)$, $(3; 0)$ лежат на оси n и, следовательно, попадают в область неопре-

деленности, а значит, необходимо продолжить испытания. Пусть четвертое учение с применением нового ТП оказалось неудачным. К линии, проходящей через точки $(1; 0)$, $(2; 0)$, $(3; 0)$, добавляется звено с вершиной в точке $(4; 1)$. Процесс продолжается до тех пор, пока ломаная, соединяющая точки (n_i, m_i) (где i — номер учения), не пересечет линию m_0 или m_1 .

График на рис. 3 иллюстрирует пример последовательного анализа, когда в четвертом, шестом и восьмом учениях новый ТП оказался не отвечающим предъявляемым требованиям по эффективности. В этом случае после восьмого опыта ломаная линия пересекает прямую $m_1 = 1,47 + 0,1n$ и оказывается в зоне принятия решения об отклонении нового ТП. Итак, чтобы сформировать решение об эффективности нового ТП действий сил, в нашем примере потребовалось провести восемь учений.

Табличная интерпретация метода

Продemonстрируем возможность использования таблицы для последовательного анализа на пригодность нового ТП [11, 12]. В этом случае до начала проведения исследования потребуется рассчитать значения m_1 и m_0 для некоторого количества учений n : $m_1 = 1,47 + 0,1n$ и $m_0 = -0,64 + 0,1n$. Принято называть m_0 приемочным числом, а m_1 — браковочным [11]. При заполнении таблицы в графу со значениями m_0 имеет смысл включать только положительные числа, так как число m , которое будет сравниваться с m_0 , всегда неотрицательно.

В ходе последовательного анализа в каждом опыте подсчитывают количество m проведенных на данный момент учений, не соответствующих предъявляемым требованиям. Результаты заносят в таблицу.

Как и при использовании графического метода, проверка продолжается до тех пор, пока не будет выполнено условие $m_0 < m < m_1$. При первом случае невыполнения указанного неравенства проверка прекращается, а именно:

- если $m \leq m_0$, то рекомендуется принять новый ТП к применению в оперативной деятельности пожарных подразделений;

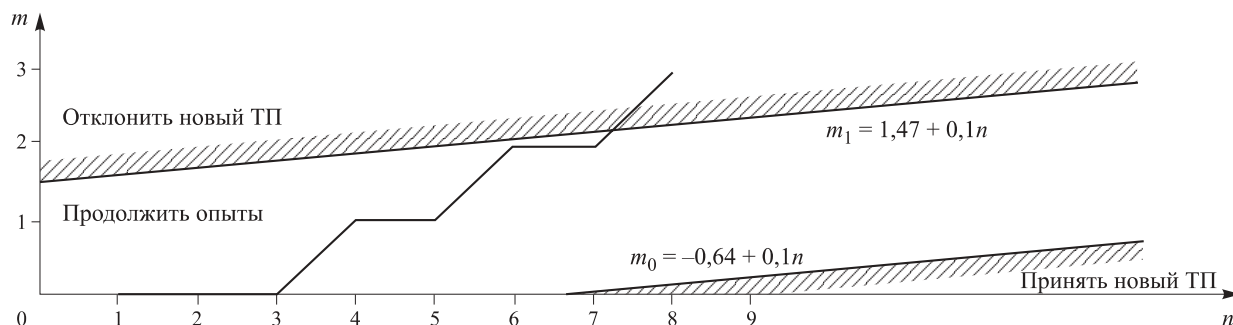


Рис. 3. График последовательного анализа нового тактического приема

- если $m > m_1$, то рекомендуется отклонить новый ТП.

В результате последовательного анализа после восьмой проверки сформировано решение о том, что новый ТП действий ПСП не отвечает предъявляемым требованиям по критерию эффективности при тушении пожаров, поэтому следует рассмотреть более эффективный ТП.

Выводы

Очевидно, что математическое моделирование с помощью метода последовательного анализа практически полезно и позволяет принимать гарантированное и научно обоснованное решение относительно новых разработанных тактических приемов действий ПСП с высокой надежностью и точностью в соответствии с требуемым критерием эффективности выполнения поставленной задачи по тушению пожаров разных уровней сложности сравнительно за небольшое количество испытаний (учений).

Отметим, что рассмотренный в статье метод применим для решения широкого круга задач оперативной деятельности МЧС России, например для

Номер опыта n	Приемочное число m_0	Количество учений с неудачным результатом m	Браковочное число m_1
1	—	0	1,57
2	—	0	1,67
3	—	0	1,77
4	—	1	1,87
5	—	1	1,97
6	—	2	2,07
7	0,06	2	2,17
8	0,16	3	2,27

моделирования процесса формирования решения о принятии на вооружение нового образца средства индивидуальной защиты или выработки решения о том, является ли кондиционной партия пожарно-технического вооружения, хранящаяся на складе [12]. Важно, чтобы исследуемый процесс можно было описать с помощью случайной величины, принимающей только два возможных значения — 0 и 1 (например, образец годен или не годен; боевая задача выполнена или не выполнена).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Каменецкая Н. В., Медведева О. М., Хитов С. Б. Математическое моделирование при решении задач обоснования структуры и организации функционирования мобильного госпиталя МЧС России // Вестник Санкт-Петербургского университета Государственной противопожарной службы МЧС России : научно-аналитический журнал. — 2016. — № 1. — С. 62–67.
2. Каменецкая Н. В., Медведева О. М., Хитов С. Б. Применение методов математического моделирования при решении задачи выявления и оценки радиационной, химической и биологической обстановки в зоне чрезвычайной ситуации // Проблемы управления рисками в техносфере. — 2016. — № 2(38). — С. 64–69.
3. Каменецкая Н. В., Медведева О. М., Хитов С. Б. Математическое моделирование при планировании мероприятий на проведение взрывных работ на реках в паводковый период // Современные тенденции развития науки и технологий. — 2016. — № 6-1. — С. 22–27.
4. Akbar N. S., Beg O. A. (eds.) Modeling and simulation in engineering sciences. — New York : iTexLi, 2016. — 289 p. DOI: 10.5772/62109.
5. Fitzgibbon W., Kuznetsov Yu. A., Neittaanmäki P., Pironneau O. (eds.) Modeling, simulation and optimization for science and technology. — Amsterdam : Springer, 2014. — 248 p. DOI: 10.1007/978-94-017-9054-3.
6. Siddiqi A. H., Manchanda P., Bhardwaj R. Mathematical models, methods and applications. — New York : Springer, 2015. — 309 p. DOI: 10.1007/978-981-287-973-8.
7. Методика определения расчетных величин пожарного риска на производственных объектах (с изм. на 14.12.2010) : приказ МЧС России от 10.07.2009 № 404. URL: <http://docs.cntd.ru/document/902170886> (дата обращения: 10.04.2017).
8. Вальд А. Последовательный анализ / Пер. с англ. — М. : Физматлит, 1960. — 328 с.
9. Методические рекомендации по действиям подразделений федеральной противопожарной службы при тушении пожаров и проведении аварийно-спасательных работ : утв. указанием МЧС России от 26.05.2010 № 43-2007-18. URL: <http://lawru.info/dok/2010/05/26/n220225.htm> (дата обращения: 10.04.2017).
10. Родионов Е. Г. Продолжительность тушения пожаров на выездах определенных категорий // Материалы 12-й научно-технической конференции “Системы безопасности–2003”. — М. : Академия ГПС МЧС России, 2003. URL: <http://agps-2006.narod.ru/konf/2003/sb-2003/sec-2/16.pdf> (дата обращения: 10.04.2017).
11. Волгин Н. С., Махров Н. В., Юровский В. А. Исследование операций. — Л. : ВМА, 1981. — 605 с.

12. Каменецкая Н. В., Медведева О. М., Щетка В. Ф., Хитов С. Б. Применение метода последовательного анализа для моделирования процесса выработки решения в оперативной деятельности МЧС России // Проблемы управления рисками в техносфере. — 2016. — № 3(39). — С. 73–81.
13. Динер И. Я. Исследование операций. — Л. : ВМОЛУА, 1969. — 606 с.

Материал поступил в редакцию 18 апреля 2017 г.

Для цитирования: Каменецкая Н. В., Медведева О. М., Хитов С. Б., Бардулин Е. Н. Обоснование выбора эффективных тактических приемов по тушению пожаров и проведению аварийно-спасательных работ методом последовательного анализа // Пожаровзрывобезопасность. — 2017. — Т. 26, № 5. — С. 5–12. DOI: 10.18322/PVB.2017.26.05.5-12.

English

JUSTIFICATION OF EFFECTIVE TACTICAL PROCEDURE CHOICE FIRE-FIGHTING WRECKING BY MEANS OF SEQUENTIAL ANALYSIS METHOD

KAMENETSKAYA N. V., Candidate of Technical Sciences, Professor of Higher Math and System Modeling of Complex Processes Department, Saint Petersburg University of State Fire Service of Emercom of Russia (Moskovskiy Avenue, 149, Saint Petersburg, 196105, Russian Federation; e-mail: natkam53@mail.ru)

MEDVEDEVA O. M., Candidate of Technical Sciences, Associate Professor of Higher Math and System Modeling of Complex Processes Department, Saint Petersburg University of State Fire Service of Emercom of Russia (Moskovskiy Avenue, 149, Saint Petersburg, 196105, Russian Federation; e-mail: mom65@mail.ru)

KHITOV S. B., Lecturer of Higher Math and System Modeling of Complex Processes Department, Saint Petersburg University of State Fire Service of Emercom of Russia (Moskovskiy Avenue, 149, Saint Petersburg, 196105, Russian Federation; e-mail: khitoff_s@mail.ru)

BARDULIN E. N., Candidate of Economical Sciences, Chief of the Department Management and Integrated Marketing Communications, Saint Petersburg University of State Fire Service of Emercom of Russia (Moskovskiy Avenue, 149, Saint Petersburg, 196105, Russian Federation; e-mail: uiimk@mail.ru)

ABSTRACT

One of the main directions assisting in solving the tasks setting in front of the Fire and Rescue Division of Federal Fire Service of Emercom of Russia is the development of new tactical procedures (TP) of conducting operational activities during the fires and emergencies.

Herewith the fire-rescue forces new TP adopting must be preceded by a number of trainings (experiments) proving its higher efficiency (based on specified criteria) compared to the existing ones.

However, experiments for testing new TP requires large expenditure of forces, time and money. Moreover, the experiment is not possible in cases of its connection with life or health risks.

Under these conditions and restrictions it is necessary to adopt or reject the new developed TP of forces action in a limited number of exercises. The math statistics method, called the sequential analysis method (SAM), allows not pre-determine the number of required observations. The solution at the end of checking developed TP experiment is taken at each experiment (exercise) stage. It depends on previous tests results.

The main advantage of the SAM in comparison with the classical math statistics methods (author — A. Wald) is the much smaller number of observations.

The possibility of decision making process math modeling of adopting the Fire and Rescue Division of the Federal Fire Service of Emercom of Russia new tactic action by means of SAM is considered in the article. The underlying method formula conclusion is justified. The both interpretations — graphical and tabular are presented.

The examples of SAM practical realization in cases no reason to give preference to either of two action modes before the experiment are presented.

Obviously, the SAM math modeling is practically useful and allows to take the guaranteed and science-based decision on the new developed forces action TP with high reliability and precision for a relatively small number.

Keywords: math modeling; sequential analysis; verification of statistical hypotheses; evaluation of the quality of tactical methods of forces actions; fire-rescue units.

REFERENCES

1. Kamenetskaya N. V., Medvedeva O. M., Khitov S. B. Mathematical modeling in problem of solving situation of explanation of the structure and functioning of the field hospital of Emercom of Russia. *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*, 2016, no. 1, pp. 62–67 (in Russian).
2. Kamenetskaya N. V., Medvedeva O. M., Khitov S. B. Application of methods of mathematical modeling at the solution of the problem of identification and the assessment of radiation, chemical and biological situation in zone of emergency. *Problemy upravleniya riskami v tekhnosfere / Problems of Technosphere Risk Management*, 2016, no. 2(38), pp. 64–69 (in Russian).
3. Kamenetskaya N. V., Medvedeva O. M., Khitov S. B. Mathematical modeling in planning to conduct blasting operations on the rivers in the flood period. *Sovremennyye tendentsii razvitiya nauki i tekhnologii / Modern Trends in the Development of Science and Technology*, 2016, no. 6-1, pp. 22–27 (in Russian).
4. Akbar N. S., Beg O. A. (eds.). *Modeling and simulation in engineering sciences*. New York, iTeXLi, 2016. 289 p. DOI: 10.5772/62109.
5. Fitzgibbon W., Kuznetsov Yu. A., Neittaanmäki P., Pironneau O. (eds.). *Modeling, simulation and optimization for science and technology*. Amsterdam, Springer, 2014. 248 p. DOI: 10.1007/978-94-017-9054-3.
6. Siddiqi A. H., Manchanda P., Bhardwaj R. *Mathematical models, methods and applications*. New York, Springer, 2015. 309 p. DOI: 10.1007/978-981-287-973-8.
7. *The procedure for determining estimated fire risk values at production facilities*. Order of Emercom of Russia on 10.07.2009 No. 404 (in Russian). Available at: <http://docs.cntd.ru/document/902170886> (Accessed 10 April 2017).
8. Wald A. *Sequential analysis*. New York, John Wiley & Sons, Inc., 1947. 221 p. (Russ. ed.: Wald A. *Posledovatelnyy analiz*. Moscow, Fizmatlit Publ., 1960. 328 p.
9. *Methodical recommendations on the actions of units of the federal firefighting service for extinguishing fires and conducting emergency rescue operations*. Approved by the order of Emercom of Russia on 26.05.2010 No. 43-2007-18 (in Russian). Available at: <http://lawru.info/dok/2010/05/26/n220225.htm> (Accessed 10 April 2017).
10. Rodionov E. G. The duration of extinguishing fires on exits of certain categories. In: *Materialy 12-y nauchno-tekhnicheskoy konferentsii "Sistemy bezopanosti-2003"* [Proceedings of 12th Scientific-Technical Conference "Safety Systems-2003"]. Moscow, State Fire Academy of Emercom of Russian Publ., 2003 (in Russian). Available at: <http://agps-2006.narod.ru/konf/2003/sb-2003/sec-2/16.pdf> (Accessed 10 April 2017).
11. Volgin N. S., Makhrov N. V., Yurovskiy V. A. *Issledovaniye operatsiy* [Operations research]. Leningrad, Naval Academy Publ., 1981. 605 p. (in Russian).
12. Kamenetskaya N. V., Medvedeva O. M., Shchetka V. Ph., Khitov S. B. Application of sequential analysis for simulation decision-making process in the operational activities of Emercom of Russia. *Problemy upravleniya riskami v tekhnosfere / Problems of Technosphere Risk Management*, 2016, no. 3(39), pp. 73–81 (in Russian).
13. Diner I. Ya. *Issledovaniye operatsiy* [Operations research]. Leningrad, VMOLUA Publ., 1969. 606 p. (in Russian).

For citation: Kamenetskaya N. V., Medvedeva O. M., Khitov S. B., Bardulin E. N. Justification of effective tactical procedure choice fire-fighting wrecking by means of sequential analysis method. *Pozharovzryvbezopasnost / Fire and Explosion Safety*, 2017, vol. 26, no. 5, pp. 5–12 (in Russian). DOI: 10.18322/PVB.2017.26.05.5-12.

В. А. ГОРЕВ, д-р физ.-мат. наук, профессор кафедры комплексной безопасности в строительстве, Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет (Россия, 129337, г. Москва, Ярославское шоссе, 26; e-mail: ICA_kbs@mgsu.ru)

Е. Ю. САЛЫМОВА, канд. техн. наук, старший преподаватель кафедры комплексной безопасности в строительстве, Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет (Россия, 129337, г. Москва, Ярославское шоссе, 26; e-mail: kiara_lion@mail.ru)

УДК 614.841.343

О ВОЗМОЖНОСТИ ВИБРАЦИОННОГО ГОРЕНИЯ ПРИ ВНУТРЕННИХ ВЗРЫВАХ

Проанализированы условия возбуждения вибрационного горения в помещениях и аппаратах. Установлено, что главной причиной возбуждения является формирование волны разрежения в результате сокращения площади горения при взаимодействии пламени с ограждающими стенками. Показано, что волна разрежения возмущает горение таким образом, что скорость тепловыделения вызывает рост давления. Определено, что в объеме генерируются и усиливаются акустические волны, амплитудное давление в колебаниях которых в разы превышает давление квазистатического взрыва. Установлено также, что необходимыми условиями для вибрационного горения является способность стен отражать колебания и способность зоны горения возбуждаться под действием акустических колебаний, так что горение в углах стабилизируется и пламя не уносится через сбросное отверстие истекающими газами.

Ключевые слова: вибрационное горение; дефлаграционный внутренний взрыв; волна разрежения; истечение газов; стоячие акустические волны.

DOI: 10.18322/PVB.2017.26.05.13-20

Введение

Для уменьшения ущерба от аварийного взрыва в помещениях или замкнутых аппаратах используют разрядные устройства или предохранительные конструкции (ПК) [1, 2]. Они эффективно снижают давление в случае квазистатического характера взрыва, когда отсутствуют волновые процессы [3]. Это объясняется тем фактом, что воздействие волн на предохранительные и ограждающие конструкции происходит одновременно через определенный промежуток времени $t \approx L/C_0$ (где L — характерный размер объема, м; C_0 — скорость звука в исходном газе, м/с), а для выравнивания давления в результате истечения требуется в несколько раз больше времени. В связи с этим на ограждающие конструкции, а через связи и на несущие конструкции будет воздействовать волновая нагрузка, не искаженная вскрытием ПК.

Квазистатические условия, в частности, реализуются при дефлаграционных газовых взрывах, если скорости горения относительно низки ($W < 30$ м/с) и характерное время их изменения на каком-либо участке размером λ больше времени распространения звуковых возмущений в объеме размером L :

$$\lambda/\Delta W \gg L/C_0, \quad (1)$$

где ΔW — характерное изменение видимой скорости пламени.

Условие (1) означает, что возмущения давления в объеме успевают выравниваться.

Предохранительные конструкции будут эффективными в случае выполнения следующих условий:

- взрыв квазистатический;
- темп нарастания давления, благодаря горению, меньше темпа его сброса в результате истечения газов.

Второе условие эквивалентно двум требованиям:

1) общая площадь истечения газов должна удовлетворять условию:

$$\sum U_{-i} v_i S_{0i} > U_r (\sigma - 1) F_{f \max}, \quad (2)$$

где U_{-i} — скорость истечения газов из i -го отверстия, зависящая от их плотности и допускаемого давления взрыва, определяемого прочностью защищаемого объекта;

v_i — коэффициент расхода;

S_{0i} — площадь i -го открытого отверстия, через которое происходит истечение;

U_r — скорость горения (турбулентная);

σ — степень расширения при горении, зависящая от давления;

$F_{f\max}$ — максимальная площадь пламени во время взрыва;

2) вскрытие разрядных устройств, т. е. открытие площади для истечения газов, должно происходить быстро, и инерционные ПК должны удовлетворять условию [3–5]:

$$\Delta P_1 = \Delta P_B \frac{A}{(A^{1/2} - 1)^2}, \quad (3)$$

где ΔP_1 — максимальное давление взрыва в момент вскрытия ПК, которое должно быть меньше допускаемого давления;

ΔP_B — давление вскрытия ПК;

$$A = \frac{v(a+b)ab\Delta P_B^{3/2}N}{2^{1/2}\pi m_{ПК}\rho_0^{1/2}U_r^3(\sigma-1)\sigma^2};$$

v — коэффициент расхода;

a, b — размеры отверстия;

N — число вскрываемых ПК;

$m_{ПК}$ — масса ПК;

ρ_0 — плотность исходной смеси.

Таким образом, в случае когда волновые процессы определяют характер внутреннего взрыва, требования, предъявляемые к сбросным устройствам, не выполняются. Даже при заранее открытых проемах для сброса давления истечение газов не будет описываться уравнением Бернулли. Расход через проем будет следовать за волновым характером изменения давления в месте истечения. За счет процессов отражения от стенок поток через проем будет частично запирается и, как следствие, сброс давления будет тормозиться.

Цель работы — исследовать зарождение частного случая волнового взрыва в замкнутом пространстве, который обусловлен вибрационным горением части газовой смеси. Давление при таком взрыве колеблется с частотой основной моды внутреннего пространства, заполненного продуктами взрыва. Подобный режим горения регулярно наблюдается в камерах сгорания ракетных двигателей при случайных колебаниях подачи горючего. При внутреннем взрыве резкое изменение скорости тепловыделения может произойти при уменьшении площади горения, поэтому ставится **задача** изучить влияние снижения энерговыделения в результате контакта пламени с ограждающими конструкциями. Изменение давления при вибрационном горении носит волновой локальный характер. В момент встречи волнового возмущения давления с зоной горения происходит повышение скорости тепловыделения.

Методы исследования

Экспериментальное изучение процесса взрывного горения проводилось в кубической камере объемом 1 м^3 с квадратным отверстием размером

$0,36 \times 0,36 \text{ м}$ в центре верхней грани. В боковую грань было вставлено стекло размером $0,8 \times 0,8 \text{ м}$ для возможности проведения киносъемки процесса горения кинокамерой СКС-1М. Характер изменения давления внутри камеры измерялся датчиками давления ДМИ-0,3 и ДМИ-1.

Горючая смесь готовилась путем добавления к воздуху необходимого количества пропана с последующим перемешиванием ее посредством вентилятора в течение 5 мин и выдерживанием еще в течение 5 мин. Отверстие при этом было закрыто металлической пластиной толщиной 2 мм.

Зажигание горючей смеси осуществлялось в центре камеры. В ряде опытов перед зажиганием пластину убирали, и горение проходило в разгерметизированном объеме.

Результаты исследования и их обсуждение

Волновые процессы при внутреннем взрыве могут иметь различную природу. В первую очередь, взрывные волны образуются при заметном ускорении горения, вплоть до детонации. Расчет зданий и аппаратов на такие взрывные нагрузки аналогичен расчету на действие взрывных волн при наружном взрыве [6]. В практике защиты от взрывных нагрузок при внутреннем взрыве совершенно не рассматривается взрыв, сопровождающийся вибрационным горением, несмотря на то что это явление было обнаружено уже в работах [7–9].

Срабатывание разрядных устройств вызывает движение потоков газа в их сторону. Причем чем выше давление вскрытия, тем более интенсивные потоки газа генерируются. В начальный момент (во время вскрытия) внутрь объема распространяется волна разрежения, интенсивность которой тем больше, чем выше давление вскрытия. На рис. 1 иллюстрируют

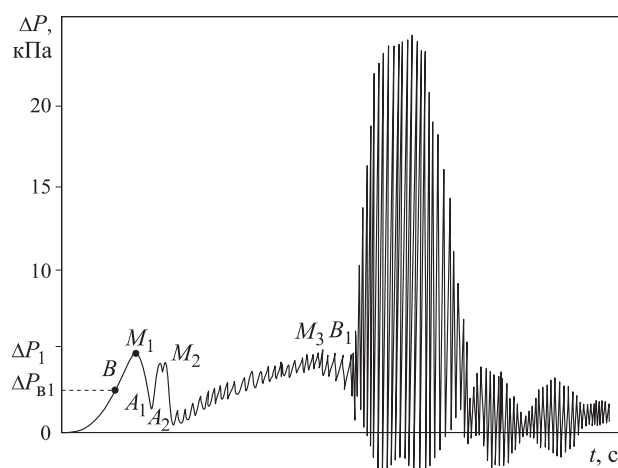


Рис. 1. Индикаторная диаграмма при внутреннем взрыве, показывающая процессы, происходящие при дефлаграционном внутреннем взрыве с учетом истечения газов

ся процессы, происходящие при дефлаграционном внутреннем взрыве с учетом истечения газов.

На рисунке участок 0–В соответствует взрыву в замкнутом объеме. В момент В происходит вскрытие ПК, при этом открывается проем (площадь) для истечения газов. До момента M_1 этой площади недостаточно, чтобы давление начало снижаться. В точке M_1 реализуется первый пик давления, но проем еще не полностью открылся. По мере его открытия площадь истечения продолжает расти, и к моменту A_1 проем оказывается открытым полностью. В этот момент реализуется локальный минимум давления. До момента M_2 давление повышается из-за роста площади горения. Наконец, в момент M_2 происходит резкое изменение скорости истечения: вместо холодной исходной смеси через отверстие начинают истекать горячие продукты горения. Скорость истечения при этом возрастает в $\sigma^{1/2}$ раз. В это время в плоскости отверстия формируется волна разрежения, которая распространяется внутрь объема и взаимодействует с фронтом пламени. Это взаимодействие приводит к неустойчивости пламени, влияние которой проявляется в появлении пульсаций поверхности пламени и слабых акустических колебаний в объеме. Об этом свидетельствуют пульсации давления малой амплитуды на участке A_2 – M_3 (см. рис. 1). Общее осредненное давление постепенно растет из-за увеличения площади поверхности пламени. После касания пламени стенок его площадь резко сокращается, и среднее давление снижается до полного прекращения горения. Пик в точке M_3 обязан максимальному значению площади фронта пламени. Обычно $F_{f\max} = KV_0^{2/3}$ (где K — коэффициент, зависящий от формы аппарата или помещения). В точке B_1 пламя достигает ребер объема аппарата или помещения.

Пульсации давления на участке A_2 – M_3 обусловлены пульсацией фронта пламени. При таком развитии неустойчивости поверхность фронта пламени не претерпевает инверсий. Возбуждается пульсационная неустойчивость от малых возмущений и всех длин волн более критической длины $\lambda_{кр}$, которая соответствует удвоенной толщине пламени [10].

Вследствие этого происходит резкое уменьшение площади горения и скорости образования горячих газов. Из мест истечения к стенкам устремляется волна разрежения, интенсивность которой пропорциональна скорости снижения тепловыделения или в нашем случае скорости сокращения площади горения.

Эта волна оттягивает зону горения назад, тем самым снова увеличивая площадь горения, что приводит к росту давления и реализации критерия Рэлея [11, 12], когда рост давления и рост тепловыделения

имеют совпадение по фазе, несмотря на то что инициирующим событием интенсификации горения являлась волна разрежения. В дальнейшем из-за положительной обратной связи (критерий Рэлея) происходит рост амплитуды колебаний давления в стоячей волне, который ограничен содержанием горючей смеси в углах объема. Подобные явления наблюдаются в вытянутых объемах (трубах), когда пламя касается стенок на сравнительно ранних стадиях взрыва, поэтому вибрационное горение в протяженных объемах более ярко выражено и амплитуды колебаний давления и скорости могут привести даже к прекращению горения [12]. Вибрационное горение наблюдается и при взрывах в замкнутых сосудах [13]. Природа его появления та же — возбуждение волны разрежения из-за уменьшения площади горения при контакте зоны горения с твердыми стенками аппарата или помещения.

Как следует из анализа газодинамических процессов, протекающих внутри объема взрыва в результате касания пламени ограждающих стенок и образования волны разрежения, возможны следующие сценарии развития ситуации:

- волна разрежения оттягивает пламя от стенок, горение не может стабилизироваться, и пламя вытягивается наружу; догорания в углах не происходит. На рис. 1 на участке после B_1 осцилляции отсутствуют и давление плавно падает до нуля;
- волна разрежения оттягивает пламя от стенок, горение стабилизируется в месте истечения, где возникают зоны обратных токов (рис. 2), и в результате возникает вибрационное горение с догоранием смеси в углах (рис. 3, в);
- при реализации критерия Рэлея происходит усиление вибраций среды, пламя при этом теряет устойчивость (проявляется осцилляционная неустойчивость [14]), поверхность фронта пламени претерпевает инверсию (объемы горючей смеси проникают в продукты горения и сгорают там либо фронтально, либо перемешиваясь с продуктами горения [12]).

При этом горение интенсифицируется и происходит его стабилизация в углах [15, 16], пламя не увлекается истекающими газами. Стабилизация горения в углах достигается также из-за затрудненного истечения газов наружу при внутренних колебаниях среды. При более слабых начальных возмущениях или менее чувствительных смесях вибрационное горение может не возбуждаться.

При положительной обратной связи происходит нарастание амплитуды колебаний, ламинарный фронт пламени разрушается, и горение продолжается по объемному механизму, как в реакторе идеального смешения. Так происходит в условиях нашего эксперимента; методика описана в [17, 18]. В дополне-

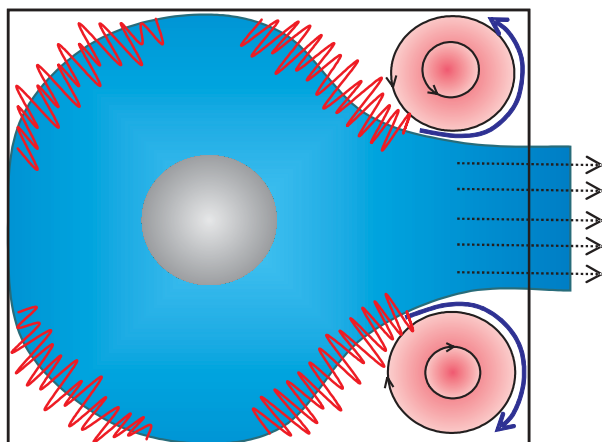


Рис. 2. Возникновение вибрационного горения с догоранием смеси в углах: синий цвет — зона продуктов горения; красный — вибрационное горение; серый — отсутствие горения

ние к измерениям давления и фотосъемке в камерах устанавливались ионизационные датчики. Особое значение придавалось показаниям датчиков, расположенных в углах камеры. На рис. 3,в представлены результаты опытов в камере объемом $0,1 \text{ м}^3$. Синий цвет соответствует первоначальному пламени, красный — горению в углах в вибрационном режиме, темный в середине кадра — площади, где горение прекратилось из-за контакта пламени со стенками.

На рис. 3,а видно, как в правом верхнем углу зарождаются очаги горения, обозначенные красным цветом. Это уже результат реакции между исходной смесью и продуктами реакции после их смешения. На рис. 3,б в этом углу произошла окончательная стабилизация горения, а на рис. 3,в площадь горения расширилась. При этом в объеме наблюдается усиление колебаний стоячих волн.

Таким образом, горение и колебание газа усиливают друг друга. Следует отметить еще одну особенность: истечение газа из объема происходит прерывисто, в соответствии с колебаниями внутри объема,

и при больших амплитудах колебаний холодный газ может проникать внутрь его, а истечение будет затрудняться вследствие запираания потока при отражении фазы сжатия на стенке с отверстием. Впервые на запираание потока при вибрациях внутри объема указано в [14]. В наших опытах отверстие для истечения газов являлось источником звуковых сигналов высокой частоты. В работах [8, 17, 18] описаны опыты, в которых внутренние стенки покрывались звукопоглощающим материалом (войлок, асбест). Вибрационного горения в этих случаях не наблюдалось. При этом смеси, в которых возбуждалось вибрационное горение, не догорали в условиях отсутствия вибрационного горения, т. е. горение этих смесей не стабилизировалось. С другой стороны, когда углы объема были заполнены вставками, горение в углах отсутствовало, так как гореть было нечему, и вибрационное горение не наблюдалось.

Заключение

Таким образом, можно заключить, что вибрационное горение возбуждается в момент формирования волны разрежения в результате сокращения зоны горения из-за взаимодействия пламени с ограждающими стенками объема. Чем выше интенсивность волны разрежения, тем легче возбуждается вибрационное горение. Вибрационное горение в объемах развивается в основном в углах, так как после касания пламени стенок горячая смесь остается только там. В удлиненных объемах вибрационное горение может длиться гораздо дольше. К вибрационному горению наиболее склонны смеси, в которых развивается диффузионно-тепловая неустойчивость, когда легкий компонент имеется в недостатке [8]. Вибрационное горение труднее возбуждается при высоких частотах возмущений, т. е. в малых объемах [12].

При защите от взрыва достаточно прочных аппаратов применяют разрывные мембраны с высоким уровнем давления вскрытия. При этом вскрытие мембран происходит настолько быстро, что формируется волна разрежения высокой интенсивности.



Рис. 3. Процесс вибрационного горения газа внутри камеры с прерывистым истечением газов

Взаимодействие ее с фронтом пламени может привести к переходу горения в детонацию [19].

Вибрационное горение может развиваться от многоочагового воспламенения при продолжительном периоде индукции [10–23], а также при повторном воспламенении смеси, состоящей из продуктов горения и исходной горючей смеси [24, 25].

При взрыве внутри помещений вскрытие ПК происходит при низких давлениях и в течение конечного времени, так что волна разрежения не образуется. Вибрационное горение может возбудиться также в объеме, в котором проемы были открыты еще до начала взрыва [18]. Вибрационное горение может вызвать резонансные явления при отклике некоторых конструкций, если их собственная частота соответствует частоте колебаний в стоячей волне: $f = C/(2L)$ (где C — скорость звука в газовой среде), ведь амплитуда давлений в стоячей волне может в

десять раз превышать давление, на фоне которого развивается вибрационное горение.

В заключение отметим, что давление при вибрационном горении по природе волновое и его рост обусловлен как колебаниями тепловыделения, так и уменьшением скорости истечения газов по сравнению со стационарным режимом. Попытки описать изменение давления при вибрационном горении с помощью подбора коэффициентов турбулизации методологически не обоснованы. Так, в [26] для описания результатов экспериментов, в ходе которых возникли волновые процессы, в рамках квазистатического подхода автор вынужден был использовать фактор турбулизации $\chi > 20$. Очевидно, что в случае детонации [19, 22] описать динамику изменения давления с помощью аппарата, соответствующего квазистатическому режиму, еще труднее, а с учетом явления отражения волн — тем более.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Пилюгин Л. П. Обеспечение взрывоустойчивости зданий с помощью предохранительных конструкций. — М. : Асс. “Пожнаука”, 2000. — 224 с.
2. СП 56.13330.2011. Производственные здания. — Введ. 20.05.2011. — М. : Минрегион России, 2011.
3. Салымова Е. Ю. Динамика развития опасных факторов в зданиях с ограждающими конструкциями из трехслойных сэндвич-панелей при пожарах и взрывах : дис. ... канд. техн. наук. — М. : МГСУ, 2014. — 110 с.
4. Gorev V., Salymova E. The use of sandwich-panels as a safety and easily thrown off designs for internal explosions // 5th International Scientific Conference “Integration, Partnership and Innovation in Construction Science and Education”. — 2016. — Vol. 86. — № 04025. — 5 p. DOI: 10.1051/mateconf/20168604025.
5. Горев В. А., Салымова Е. Ю. Использование сэндвич-панелей в качестве эффективных легко-сбрасываемых конструкций при внутренних взрывах в промышленных зданиях // Пожаровзрывобезопасность. — 2010. — Т. 19, № 2. — С. 41–44.
6. Попов Н. Н., Расторгуев Б. С., Забегаев А. В. Расчет конструкций на динамические и специальные нагрузки. — М. : Высшая школа, 1992. — 319 с.
7. Solberg D. M., Pappas J. A., Skramstad E. Observations of flame instabilities in large scale vented gas explosions // Symposium (International) on Combustion. — 1981. — Vol. 18, issue 1. — P. 1607–1614. DOI: 10.1016/s0082-0784(81)80164-6.
8. Van Wingerden C. J. M., Zeeuwen J. P. On the role of acoustically driven flame instabilities in vented gas explosions and their elimination // Combustion and Flame. — 1983. — Vol. 51. — P. 109–111. DOI: 10.1016/0010-2180(83)90088-3.
9. Zalosh R. G. Gas explosion tests in room-size vented enclosures // AIChE Loss Prevention. — New York : American Institute of Chemical Engineers, 1980. — Vol. 13. — P. 98–108.
10. Маркштейн Дж. Г. Явления неустойчивости фронта пламени // Вопросы горения и детонационных волн : сборник докладов конференции. — М. : Оборонизд, 1958. — С. 436–438.
11. Раушенбах Б. В. Вибрационное горение. — М. : Физматгиз, 1961. — 500 с.
12. Нестационарное распространение пламени / Под ред. Маркштейна Дж. Г.; пер. с англ. — М. : Мир, 1968. — 437 с.
13. Карпов В. П. Ячеистая структура пламени в условиях бомбы постоянного объема и связь ее с вибрационным горением // Физика горения и взрыва. — 1965. — № 3. — С. 68–74.
14. McCann D. P. J., Thomas G. O., Edwards D. H. Gazdynamics of vented explosions. Part II: One-dimensional wave interaction model // Combustion and Flame. — 1985. — Vol. 60, issue 1. — P. 63–70. DOI: 10.1016/0010-2180(85)90118-x.
15. Фурлетов В. И. Колебания скорости тепловыделения при вибрационном горении // Горение гетерогенных и газовых систем : материалы VIII Всесоюзного симпозиума по горению и взрыву. — Черноголовка, 1986. — С. 32–35.

16. Горбатко А. А., Кузнецов В. Р., Лунатов П. А. Применение фронтальной модели горения к анализу стабилизации пламени плохообтекаемыми телами // Горение гетерогенных и газовых систем : материалы VIII Всесоюзного симпозиума по горению и взрыву. — Черноголовка, 1986. — С. 35–39.
17. Горев В. А., Беляев В. В., Федотов В. Н. Условие начала вибрационного горения газа в разгерметизированном сосуде прямоугольной формы // Физика горения и взрыва. — 1989. — Т. 25, № 1. — С. 36–39.
18. Горев В. А., Федотов В. Н. О роли акустических колебаний при взрывном горении газов в разгерметизированном сосуде // Структура газовых пламен : материалы Международного семинара по структуре газовых пламен. — Новосибирск, июль 1986. — С. 202–208.
19. Dorofeev S. B., Bezmelnitsin A. V., Sidorov V. P. Transition to detonation in vented hydrogen-air explosions // Combustion and Flame. — 1995. — Vol. 103, issue 3. — P. 243–246. DOI: 10.1016/0010-2180(95)00148-y.
20. Medvedev S. P., Agafonov G. L., Khomik S. V. Low-temperature ignition delay for hydrogen-air mixtures in light of a reaction mechanism with quantum correction // Acta Astronautica. — 2016. — Vol. 126. — P. 150–153. DOI: 10.1016/j.actaastro.2016.04.019.
21. Urzay J., Kseib N., Davidson D. F., Iaccarino G., Hanson R. K. Uncertainty-quantification analysis of the effects of residual impurities on hydrogen-oxygen ignition in shock tubes // Combustion and Flame. — 2014. — Vol. 161, issue 1. — P. 1–15. DOI: 10.1016/j.combustflame.2013.08.012.
22. Medvedev S. P., Polenov A. N., Khomik S. V., Gelfand B. E. Initiation of upstream-directed detonation induced by the venting of gaseous explosion // Symposium (International) on Combustion. — 1994. — Vol. 25, issue 1. — P. 73–78. DOI: 10.1016/s0082-0784(06)80630-2.
23. Гельфанд Б. Е., Попов О. Е., Чайванов Б. Б. Водород: параметры горения и взрыва. — М. : Физматлит, 2008. — 288 с.
24. Горев В. А., Мирошников С. Н. Ускоряющееся горение в газовых объемах // Химическая физика. — 1982. — № 6. — С. 854–858.
25. Phylaktou H., Andrews G. E. The acceleration of flame propagation in a tube by an obstacle // Combustion and Flame. — 1991. — Vol. 85, issue 3-4. — P. 363–379. DOI: 10.1016/0010-2180(91)90140-7.
26. Molkov V. V. Theoretical generalization of international experimental data on vented gas explosion dynamics // Physics of Combustion and Explosions. — 1995. — No. 25. — P. 165–181.

Материал поступил в редакцию 20 апреля 2017 г.

Для цитирования: Горев В. А., Салымова Е. Ю. О возможности вибрационного горения при внутренних взрывах // Пожаровзрывобезопасность. — 2017. — Т. 26, № 5. — С. 13–20. DOI: 10.18322/PVB.2017.26.05.13-20.

English

ABOUT THE POSSIBILITY OF VIBRATION COMBUSTION AT INTERNAL EXPLOSIONS

GOREV V. A., Doctor of Physical and Mathematical Sciences, Professor of Department of Complex Safety in Construction, National Research Moscow State University of Civil Engineering (Yaroslavskoye Shosse, 26, Moscow, 129337, Russian Federation; e-mail: ICA_kbs@mgsu.ru)

SALYMOVA E. Yu., Candidate of Technical Sciences, Senior Lecturer of Department of Complex Safety in Construction, National Research Moscow State University of Civil Engineering (Yaroslavskoye Shosse, 26, Moscow, 129337, Russian Federation; e-mail: kiara_lion@mail.ru)

ABSTRACT

Vibration combustion is wave process. It is excited in result of interaction of the flame front with a depression wave which is formed as a result of sharp decrease of speed of a thermal emission, because of decrease of burning area at contact of a flame with the walls limiting volume. The flame

under the influence of a wave of expansion tries to return to former situation and again to increase burning area. Fluctuations of gas and fluctuation of the combustion zone are as a result generated. Fluctuations amplify — the flame loses stability, combustion accelerates. The more the camera volume, the easier a flame loses stability. There are especially inclined to vibration combustion of mix, showing diffusion and thermal instability. Mixes with a lack of a mild component belong to such mixes. Speed of heat release and pressure in volume change with oscillation frequency of gas that complicates the expirations from volume. The combustion mode at the strong fluctuations passes from the surface in volume that is followed by change of character of a luminescence of the combustion zone. Amplitude value of pressure in waves can exceed several times pressure against the background of which vibration combustion develops. In squared volumes in the mode of vibration combustion the mix which remained in corners as combustion in this case is stabilized in corners burns down. Experiences in which fluctuation of gas was suppressed with a covering of walls with a felt took place without vibration combustion. In self-contained volumes vibration combustion is also excited in result of interaction of the combustion zone with volume walls in this case stabilization it is not required as the expiration of gases does not happen. When smoothing corners of volume vibration combustion quickly stops. Otherwise combustion in corners does not reach as the flame is extended with the expiring gases. It is apparent that the processes happening at vibration combustion cannot be described by means of quasi-stationary representations.

Building constructions of buildings of explosive productions need to be counted taking into account possible pressure roughness if there is a threat of emergence of vibration combustion.

Keywords: vibration combustion; internal explosion; expansion wave; gases expiration; acoustic waves.

REFERENCES

1. Pilyugin L. P. *Obespecheniye vzryvoustoychivosti zdaniy s pomoshchyu predokhranitelnykh konstruktсий* [Maintenance explosion proof buildings with relief designs]. Moscow, Pozhnauka Publ., 2000. 224 p. (in Russian).
2. *Set of rules 56.13330.2011. Production buildings*. Moscow, Ministry of Regional Development of Russia Publ., 2011 (in Russian).
3. Salymova E. Yu. *Dynamics of development of dangerous factors in buildings with enclosing structures made of sandwich panels in fires and explosions*. Cand. tech. sci. diss. 2014. 110 p. (in Russian).
4. Gorev V., Salymova E. The use of sandwich-panels as a safety and easily thrown off designs for internal explosions. In: *5th International Scientific Conference "Integration, Partnership and Innovation in Construction Science and Education"*, 2016, vol. 86, no. 04025. 5 p. DOI: 10.1051/mateconf/20168604025.
5. Gorev V. A., Salymova E. Yu. Usage of sandwich-panels as effective easily jettisonable constructions by inside combustions in industrial buildings. *Pozharovzryvbezopasnost / Fire and Explosion Safety*, 2010, vol. 19, no. 2, pp. 41–44 (in Russian).
6. Popov N. N., Rastorguev B. S., Zabegaev A. V. *Raschet konstruktсий na dinamicheskiye i spetsialnyye nagruzki* [Calculation of designs on inertial express reaction]. Moscow, Vysshaya shkola Publ., 1992. 319 p. (in Russian).
7. Solberg D. M., Pappas J. A., Skramstad E. Observations of flame instabilities in large scale vented gas explosions. In: *Symposium (International) on Combustion*, 1981, vol. 18, issue 1, pp. 1607–1614. DOI: 10.1016/s0082-0784(81)80164-6.
8. Van Wingerden C. J. M., Zeeuwen J. P. On the role of acoustically driven flame instabilities in vented gas explosions and their elimination. *Combustion and Flame*, 1983, vol. 51, pp. 109–111. DOI: 10.1016/0010-2180(83)90088-3.
9. Zalosh R. G. Gas explosion tests in room-size vented enclosures. In: *AIChE Loss Prevention*. New York, American Institute of Chemical Engineers, 1980, vol. 13, pp. 98–108.
10. Markstein G. H. Phenomena of instability of the flame front. In: *Voprosy goreniya i detonatsionnykh voln: sbornik dokladov konferentsii* [Questions of Combustion and Detonation Waves. Proceedings of Conference]. Moscow, Oboronizd, 1958, pp. 436–438 (in Russian).
11. *Raushenbakh B. V. Vibratsionnoye goreniye* [Vibration combustion]. Moscow, Fizmatgiz Publ., 1961. 500 p. (in Russian).
12. Markshtein G. H. *Nonsteady flame propagation*. Oxford, Pergamon Press, 1964. (Russ. ed.: Markstein G. H. (ed.). *Nestatsionarnoye rasprostraneniye plameni*. Moscow, Mir Publ., 1968. 437 p.).

13. Karpov V. P. Cellular flame structure under conditions of a constant-volume bomb and its relationship with vibratory combustion. *Combustion, Explosion, and Shock Waves*, 1965, vol. 1, issue 3, pp. 39–42. DOI: 10.1007/bf00760215.
14. McCann D. P. J., Thomas G. O., Edwards D. H. Gazdynamics of vented explosions. Part II: One-dimensional wave interaction model. *Combustion and Flame*, 1985, vol. 60, issue 1, pp. 63–70. DOI: 10.1016/0010-2180(85)90118-x.
15. Furletov V. I. Fluctuations of speed of a thermal emission at vibration combustion. In: *Goreniye geterogennykh i gazovykh sistem: materialy VIII Vsesoyuznogo simpoziuma po goreniyu i vzryvu* [Combustion of heterogeneous and gas systems. Proceedings of VIII All-Union Symposium on Combustion and Explosion]. Chernogolovka, 1986, pp. 32–35 (in Russian).
16. Gorbatko A. A., Kuznetsov V. R., Lipatov P. A. Application of the frontal model of combustion to the analysis of stabilization of a flame bodies. In: *Goreniye geterogennykh i gazovykh sistem: materialy VIII Vsesoyuznogo simpoziuma po goreniyu i vzryvu* [Combustion of heterogeneous and gas systems. Proceedings of VIII All-Union Symposium on Combustion and Explosion]. Chernogolovka, 1986, pp. 35–39 (in Russian).
17. Gorev V. A., Belyaev V. V., Fedotov V. N. Condition of the beginning of vibrational gas combustion in an unsealed vessel of rectangular shape. *Combustion, Explosion, and Shock Waves*, 1989, vol. 25, no. 1, pp. 31–34. DOI: 10.1007/bf00758231.
18. Gorev V. A., Fedotov V. N. About a role of acoustic vibrations at explosive combustion of gases in the depressurized vessel. In: *Struktura gazovykh plamen: materialy Mezhdunarodnogo seminar po strukture gazovykh plamen* [Structure gas flames. Proceedings of International Seminar on Structure Gas Flames]. Novosibirsk, July 1986, pp. 202–208 (in Russian).
19. Dorofeev S. B., Bezmelnitsin A. V., Sidorov V. P. Transition to detonation in vented hydrogen-air explosions. *Combustion and Flame*, 1995, vol. 103, issue 3, pp. 243–246. DOI: 10.1016/0010-2180(95)00148-y.
20. Medvedev S. P., Agafonov G. L., Khomik S. V. Low-temperature ignition delay for hydrogen-air mixtures in light of a reaction mechanism with quantum correction. *Acta Astronautica*, 2016, vol. 126, pp. 150–153. DOI: 10.1016/j.actaastro.2016.04.019.
21. Urzay J., Kseib N., Davidson D. F., Iaccarino G., Hanson R. K. Uncertainty-quantification analysis of the effects of residual impurities on hydrogen-oxygen ignition in shock tubes. *Combustion and Flame*, 2014, vol. 161, issue 1, pp. 1–15. DOI: 10.1016/j.combustflame.2013.08.012.
22. Medvedev S. P., Polenov A. N., Khomik S. V., Gelfand B. E. Initiation of upstream-directed detonation induced by the venting of gaseous explosion. *Symposium (International) on Combustion*, 1994, vol. 25, issue 1, pp. 73–78. DOI: 10.1016/s0082-0784(06)80630-2.
23. Gelfand B. E., Popov O. E., Chayvanov B. B. *Vodorod: parametry goreniya i vzryva* [Hydrogen: combustion and explosion parameters]. Moscow, Fizmatlit Publ., 2008. 288 p. (in Russian).
24. Gorev V. A., Miroshnikov S. N. The accelerating combustion in gas volumes. *Khimicheskaya fizika / Chemical Physics*, 1982, no. 6, pp. 854–858 (in Russian).
25. Phylaktou H., Andrews G. E. The acceleration of flame propagation in a tube by an obstacle. *Combustion and Flame*, 1991, vol. 85, issue 3-4, pp. 363–379. DOI: 10.1016/0010-2180(91)90140-7.
26. Molkov V. V. Theoretical generalization of international experimental data on vented gas explosion dynamics. *Physics of Combustion and Explosions*, 1995, no. 25, pp. 165–181.

For citation: Gorev V. A., Salymova E. Yu. About the possibility of vibration combustion at internal explosions. *Pozharovzryvobezopasnost / Fire and Explosion Safety*, 2017, vol. 26, no. 5, pp. 13–20 (in Russian). DOI: 10.18322/PVB.2017.26.05.13-20.

Д. В. БАТОВ, д-р хим. наук, старший научный сотрудник, профессор кафедры государственного надзора и экспертизы пожаров, Ивановская пожарно-спасательная академия ГПС МЧС России (Россия, 153040, г. Иваново, просп. Строителей, 33); ведущий научный сотрудник Института химии растворов им. Г. А. Крестова РАН (Россия, 153045, г. Иваново, ул. Академическая, 1; e-mail: bat21dv@yandex.ru)

О. Е. СТОРОНКИНА, канд. хим. наук, старший преподаватель кафедры государственного надзора и экспертизы пожаров, Ивановская пожарно-спасательная академия ГПС МЧС России (Россия, 153040, г. Иваново, просп. Строителей, 33)

Т. А. МОЧАЛОВА, канд. биол. наук, заместитель начальника кафедры государственного надзора и экспертизы пожаров, Ивановская пожарно-спасательная академия ГПС МЧС России (Россия, 153040, г. Иваново, просп. Строителей, 33)

УДК 544.355-122:532.00

МОДИФИКАЦИЯ АДДИТИВНО-ГРУППОВОГО МЕТОДА ДЛЯ ОПИСАНИЯ ПОКАЗАТЕЛЕЙ ПОЖАРНОЙ ОПАСНОСТИ ПРЕДЕЛЬНЫХ УГЛЕВОДОРОДОВ: ТЕМПЕРАТУР ВСПЫШКИ И САМОВОСПЛАМЕНЕНИЯ, ЭНТАЛЬПИИ ИСПАРЕНИЯ

Предложенный ранее авторами вариант аддитивно-группового метода адаптирован для расчета температур вспышки и самовоспламенения предельных углеводородов. Показано, что в целом для парафинов нормального строения наблюдается асимптотическая зависимость вклада связи СН метиленовой группы в температуры вспышки и самовоспламенения от размера молекул. Предположено, что одинаковый вид зависимостей вызван различными причинами. Показано, что асимптотическая зависимость температуры вспышки, связанной в основном с процессом частичного испарения жидкости, обусловлена конкуренцией межмолекулярных и внутримолекулярных взаимодействий в жидкой фазе, а асимптотическая зависимость температуры самовоспламенения углеводородов, связанной с процессом окисления вещества, — сменой механизма химического взаимодействия. Получено корреляционное уравнение для описания и прогнозирования температуры вспышки предельных углеводородов и их изомеров.

Ключевые слова: показатели пожарной опасности; температура вспышки; температура самовоспламенения; энтальпия испарения; аддитивно-групповой метод; структурные фрагменты; асимптотическая зависимость; предельные углеводороды; межмолекулярные взаимодействия; внутримолекулярные взаимодействия.

DOI: 10.18322/PVB.2017.26.05.21-28

Введение

Исследование взаимосвязи строения соединений с их свойствами остается актуальной химической задачей. В рамках аддитивно-группового метода эту проблему можно решить и качественно, и количественно. Различные варианты метода групповой аддитивности используются для описания и прогнозирования параметров пожарной опасности веществ различных классов органических соединений, в том числе температур вспышки и самовоспламенения углеводородов [1–3]. Подробный обзор методов расчета температуры вспышки жидкостей приведен в работе [4]. Ранее аддитивно-групповой подход в приближении аддитивности связей был использован нами для описания и прогнозирования темпера-

туры вспышки спиртов, кетонов и сложных эфиров [5, 6].

Следует отметить, что температура вспышки и энтальпия испарения характеризуют процесс формирования пожаро- и взрывоопасных паровоздушных смесей над поверхностью жидкостей. Сведения о температуре самовоспламенения важны для создания безопасных условий хранения и использования пожаро- и взрывоопасных паровоздушных смесей, поэтому указанные свойства относятся к основным показателям пожарной опасности веществ.

Цели и задачи работы

Целью настоящей работы является установление взаимосвязи температур вспышки и самовос-

пламенения, энтальпий испарения предельных углеводородов с составом и строением их молекул с помощью метода аддитивности химических связей. В настоящей работе использованная нами ранее [5, 6] аддитивная схема адаптирована к показателям пожарной опасности предельных углеводородов.

Методика расчета

Примеры выделения СН-связей разного вида в молекулах предельных углеводородов представлены в таблице.

Исходя из приведенной схемы выделения структурных фрагментов температура вспышки или самовоспламенения $t_{\text{всп(св)}}$ может быть выражена уравнением

$$t_{\text{всп(св)}} = t_{\text{всп(св)}}(\text{CH}_p)p + t_{\text{всп(св)}}(\text{CH}_s)s + t_{\text{всп(св)}}(\text{CH}_t)t + t_{\text{всп(св)}}(\text{C}_h)h. \quad (1)$$

Здесь $t_{\text{всп(св)}}(\text{CH}_p)$, $t_{\text{всп(св)}}(\text{CH}_s)$, $t_{\text{всп(св)}}(\text{CH}_t)$, $t_{\text{всп(св)}}(\text{C}_h)$ — вклады связей соответственно метильной, метиленовой и метиновой групп, а также четвертичных атомов углерода в температуру вспышки или самовоспламенения; s , p , t , h — количество указанных структурных фрагментов, определяемое исходя из строения молекул.

Вклады $t_{\text{всп(св)}}(\text{CH}_p)$, $t_{\text{всп(св)}}(\text{CH}_s)$, $t_{\text{всп(св)}}(\text{CH}_t)$ и $t_{\text{всп(св)}}(\text{C}_h)$ рассчитываются путем регрессионного анализа величин s , p , t , h и экспериментальных данных по температуре вспышки или самовоспламенения.

Результаты и их обсуждение

Анализ данных по температуре вспышки [7–10] показал, что для предельных углеводородов постоянный вклад связи СН метиленовой группы (CH_s) или метиленовой группы в целом соблюдается для соединений, начиная с тридекана. Это подтверждает регрессионный анализ температур вспышки нор-

мальных алканов с числом связей $\text{CH}_s s \geq 20$ (число атомов углерода в молекуле $N_C \geq 12$) с использованием соотношения

$$t_{\text{всп}} = t_{\text{всп}}(\text{CH}_p)p + t_{\text{всп}}(\text{CH}_s)s = (-8,08 \pm 0,30)p + (6,30 \pm 0,07)s \quad (2)$$

$$\text{при } s_f = 0,3 \text{ }^\circ\text{C}, \quad R^2 = 0,9999, \\ n = 4 (\text{C}_{13}\text{H}_{28} - \text{C}_{16}\text{H}_{34}),$$

где s_f — стандартное отклонение;

R^2 — коэффициент корреляции;

n — размер выборки.

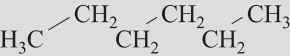
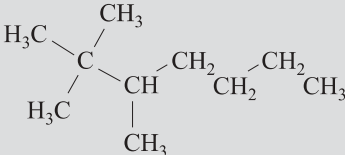
Имеющиеся данные по температуре самовоспламенения [7–10] свидетельствуют о том, что для предельных углеводородов нормального строения, начиная с н-нонана, она не изменяется и составляет $(204 \pm 2)^\circ\text{C}$. Указанное среднее отклонение ($\pm 2^\circ\text{C}$) не превышает погрешности измерений стандартной температуры самовоспламенения [7]. Таким образом, вклад метиленовой группы (или связи CH_s) формально равен нулю. В этом случае вклад связи CH_p будет равен 1/6 доле от температуры самовоспламенения: $(34,0 \pm 0,3)^\circ\text{C}$. По нашему мнению, такой подход к установлению вклада связи CH_p более правильный по сравнению с его определением исходя из температуры самовоспламенения метана ($0,25t_{\text{св}}$) или этана ($1/6t_{\text{св}}$), поскольку эти соединения не содержат никаких других видов структурных фрагментов.

Если принять вклады СН-связей в метильных радикалах постоянными для всех углеводородов, то рассчитать вклад фрагмента CH_s в температуры вспышки и самовоспламенения данного н-алкана можно по формуле

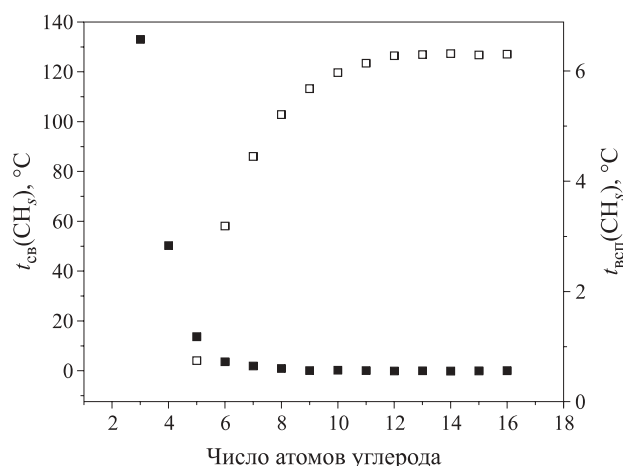
$$t_{\text{всп(св)}}(\text{CH}_s) = [t_{\text{всп(св)}} - 6 t_{\text{всп(св)}}(\text{CH}_p)]/s. \quad (3)$$

Зависимость параметров $t_{\text{св}}(\text{CH}_s)$ и $t_{\text{всп}}(\text{CH}_s)$ от числа атомов углерода в молекуле н-алкана представлена на рисунке. Приведенные данные показы-

Вид и количество СН-связей в молекулах н-гексана и 2,2,3-триметилгептана

СН-связь	Количество СН-связей в углеводороде	
	н-гексана	2,2,3-триметилгептане
		
CH_p	6	15
CH_s	8	6
CH_t	0	1
C_h	0	1

Примечание. CH_p — связи СН метильных радикалов, CH_s — метиленовых групп, CH_t — метиновых групп (третичного атома углерода), C_h — четвертичные атомы углерода.



Зависимость вклада связи СН метиленовой группы в температуры вспышки в закрытом тигле ($\square$) и самовоспламенения ($\blacksquare$) n -алканов от числа атомов углерода в молекуле

вают, что существует асимптотическая зависимость $t_{\text{всп}}(\text{CH}_3)$ и $t_{\text{св}}(\text{CH}_3)$ от размера молекул предельных углеводородов нормального строения.

Асимптотическую зависимость $t_{\text{всп}}(\text{св}) = f(s)$ хорошо описывают экспоненциальные модели с тремя подгоночными коэффициентами. В настоящей работе для описания $t_{\text{всп}}(\text{CH}_3)$ было использовано выражение, в котором коэффициент A равен предельному значению вклада связи CH_3 в температуру вспышки углеводородов ($6,30^\circ\text{C}$ по уравнению (2)):

$$t_{\text{всп}} = A + B \exp(Cs), \quad (4)$$

где A, B, C — подгоночные коэффициенты.

В результате было получено уравнение для описания вклада группы CH_3 в температуру вспышки предельных углеводородов:

$$t_{\text{всп}}(\text{CH}_3) = 6,3 - (29,51 \pm 0,89) \times \exp[(0,279 \pm 0,004)s] \quad (5)$$

при $s_f = 0,06^\circ\text{C}$, $R^2 = 0,9992$,
 $n = 12 (\text{C}_5\text{H}_{12} - \text{C}_{16}\text{H}_{34})$.

Комбинация уравнений (2) и (5) дает выражение для описания температуры вспышки предельных углеводородов нормального строения:

$$t_{\text{всп}} = t_{\text{всп}}(\text{CH}_p)p + t_{\text{всп}}(\text{CH}_3)s = -8,08p + [6,3 - 29,51 \exp(0,279s)]s. \quad (6)$$

Для описания $t_{\text{св}}(\text{CH}_3)$ было использовано выражение (4), в котором коэффициент A равен нулю (предельному значению вклада связи CH_3 в температуру самовоспламенения углеводородов). В результате было получено уравнение для описания вклада группы CH_3 в температуру самовоспламенения предельных углеводородов:

$$t_{\text{св}}(\text{CH}_3) = (377,8 \pm 11,2) \exp[(-0,520 \pm 0,012)s] \quad (7)$$

при $s_f = 2^\circ\text{C}$, $R^2 = 0,9985$,
 $n = 14 (\text{C}_3\text{H}_8 - \text{C}_{16}\text{H}_{34})$.

Комбинация уравнений (2) и (7) дает выражение для описания температуры самовоспламенения предельных углеводородов нормального строения:

$$t_{\text{всп}} = t_{\text{всп}}(\text{CH}_p)p + t_{\text{всп}}(\text{CH}_3)s = 34,0p + [377,8 \exp(-0,520s)]s. \quad (8)$$

По нашему мнению, одинаковый вид зависимостей объясняется различными причинами.

Рассмотрим температуру вспышки углеводородов. Согласно определению температуре вспышки соответствует некоторое давление пара жидкости над ее поверхностью. Таким образом, параметр $t_{\text{всп}}$ характеризует, на первый взгляд, процесс испарения жидкости при данной температуре. Авторы работы [11] отмечают, что некоторые другие свойства жидких углеводородов (плотность, термический коэффициент объемного расширения) также имеют асимптотическую зависимость от размера молекул. Как справедливо отмечено авторами [12], свойства низших членов гомологического ряда n -алканов обусловлены межмолекулярными связями. При достаточно большой длине углеродной цепи n -алканы по своей природе приближаются к полимерам, свойства которых в большей степени определяются внутримолекулярными взаимодействиями. Такой качественный переход с ростом длины углеродной цепи неизбежно должен сопровождаться асимптотическим стремлением полной энергии парафина к энергии полимера. Эти особенности межчастичных взаимодействий в углеводородах осложняют применение аддитивно-группового подхода для описания их свойств.

Другой важной характеристикой процесса испарения является его энтальпия. Рассмотрим это свойство с позиций аддитивно-группового подхода.

Анализ данных по энтальпии испарения $\Delta_{\text{исп}} H^0$ n -алканов при 25°C , заимствованных из справочника [13], показал, что наблюдается хорошая линейная зависимость от размера их молекул, т. е. вклад метиленовой группы и, соответственно, структурного фрагмента CH_2 является постоянным независимо от размера молекулы n -алкана. Это подтверждается очень хорошей корреляцией:

$$\Delta_{\text{исп}} H^0 = \Delta_{\text{исп}} H^0(\text{CH}_p)p + \Delta_{\text{исп}} H^0(\text{CH}_3)s = (1,953 \pm 0,013)p + (2,480 \pm 0,001)s \quad (9)$$

при $s_f = 0,1 \text{ кДж/моль}$, $R^2 = 0,9999$,
 $n = 13 (\text{C}_5\text{H}_{12} - \text{C}_{17}\text{H}_{36})$.

Возникает вопрос: почему два свойства вещества, характеризующие процесс его испарения, имеют разные зависимости от состава молекул? По-видимому, температура вспышки отражает разрыв малой доли межмолекулярных взаимодействий в жидкости. В этом случае внутримолекулярные взаимодействия в углеводородах составляют заметную конкурен-

цию взаимодействиям между молекулами в жидкой фазе. На фоне энтальпии испарения, характеризующей разрушение всех видов межмолекулярных взаимодействий, особенности внутримолекулярных взаимодействий не проявляются.

Для завершения описания температуры вспышки предельных углеводородов нормального строения и их изомеров были определены вклады связи CH_t и четвертичного атома углерода (C_h) путем регрессионного анализа температур вспышки структурных изомеров *n*-алканов. Следует отметить, что в указанных справочных изданиях [7–10] приведены значения температуры вспышки только для углеводородов при $s < 20$, причем многие из них рассчитаны по температуре кипения. Для расчета были использованы температуры вспышки следующих углеводородов: 2,4-диметилпентана, 2,5-диметилгептана, 4,4-диметилгептана, 2,2,5-триметилгексана, 2,3,4-триметилгексана, 2,2,3,3-тетраметилпентана, 2-метилпентана (расч.), 3-метилпентана (расч.), 2-метилгексана (расч.), 3-метилгексана (расч.), 2,2-диметилпентана (расч.), 2,3-диметилпентана (расч.), 2-метилгептана (расч.), 3-метилгептана (расч.), 2,3-диметилгексана (расч.), 2,4-диметилгексана (расч.), 2,2,3-триметилпентана (расч.), 2-метилоктана (расч.), 3-метилоктана (расч.), 4-метилоктана (расч.), 3,3-диметилгептана (расч.), 3,3-диэтилпентана (расч.), 2,4-диметил-3-этилпентана (расч.), 2-метилнонана (расч.), 2,3-диметилоктана (расч.), 4,5-диметилоктана (расч.), 2,5,5-триметилгептана (расч.), 2-этилоктана (расч.), 3-этилоктана (расч.), 4-этилоктана (расч.), 2-метилдекана (расч.), 2,2,3,3-тетраметилгептана (расч.).

При расчете постулировалось, что вклады связей CH_p и CH_s являются одинаковыми как в *n*-алканах, так и в их изомерах, поэтому регрессионному анализу была подвергнута разность ($t_{\text{всп } i}$) между температурой вспышки изомера и вкладом в температуру вспышки, обусловленным наличием в молекуле общего числа связей CH_p и CH_s . Таким образом, было получено соотношение для вкладов структурных фрагментов CH_t и C_h :

$$t_{\text{всп } i} = (55,92 \pm 0,45) t + (95,28 \pm 0,93) h \quad (10)$$

при $s_f = 3,5 \text{ }^\circ\text{C}$, $R^2 = 0,9990$, $n = 32$.

Комбинирование уравнений (6) и (10) дает выражение для описания и прогнозирования температуры вспышки в закрытом тигле предельных углеводородов нормального строения и их структурных изомеров:

$$t_{\text{всп}} = -8,08p + [6,30 - 29,51 \times \exp(0,279s)]s + 55,92t + 95,28h. \quad (11)$$

Средняя погрешность расчета $t_{\text{всп}}$ по уравнению (11) для 12 *n*-алканов $\text{C}_5\text{--C}_{16}$ и указанных выше изомеров составляет $2 \text{ }^\circ\text{C}$.

Описание энтальпии испарения предельных углеводородов в различных вариантах аддитивно-группового подхода выполнялось неоднократно [13–15], поэтому в настоящей работе эта задача не ставилась. Например, в работе [15] для 56 алканов различного строения были определены вклады в энтальпию испарения радикалов CH_3 , CH_2 , CH и C , которые равны соответственно $(5,74 \pm 0,30)$, $(4,96 \pm 0,06)$, $(2,63 \pm 0,50)$ и $(0,41 \pm 0,50)$ кДж/моль. По мнению авторов работы [15], разветвленность молекул повышает вероятность внутримолекулярных контактов. Поскольку при фиксированном размере молекулы (равенстве ван-дер-ваальсовых молярных объемов соединений с разветвленной и неразветвленной цепью) суммарное число межмолекулярных и внутримолекулярных контактов остается постоянным, увеличение внутримолекулярного взаимодействия при разветвлении молекул ослабляет межмолекулярное взаимодействие. Это в свою очередь приводит к уменьшению энтальпии испарения.

В заключение рассмотрим применение использованного метода аддитивности CH -связей для описания температуры самовоспламенения предельных углеводородов. Как и в случае с температурой вспышки, регрессионному анализу была подвергнута разность ($t_{\text{св } i}$) между температурой самовоспламенения изомера и вкладом в температуру самовоспламенения, обусловленным наличием в молекуле общего числа связей CH_p и CH_s . Для 37 соединений: 2-метилнонана, 2-метилоктана, 3-метилоктана, 4-метилоктана, 2-метилдекана, 2-этилоктана, 3-этилоктана, 4-этилоктана, 2-метилгептана, 3-метилгексана, 4,4-диметилгептана, 2-метилгексана, 4,5-диметилоктана, 3-метилпентана, 2-метилпентана, 2,4-диметилгексана, 3,3-диметилгептана, 2,3-диметилпентана, 2,4-диметилпентана, 2,3-диметилгексана, 2,2,3,3-тетраметилгептана, 2,3,4-триметилгексана, 2,3,3-триметилгексана, 3,3,4-триметилгексана, 2,4-диметила, 3-этилпентана, 2,2,4-триметилпентана, 2,2-диметилбутана, 2,2,3,3-тетраметилпентана, 2,2,3-триметилпентана, 2,2,3-триметилбутана, 2,3-диметилоктана, 2,5-диметилгептана, 2,5,5-триметилгептана, 3,3-диэтилпентана, 2-метилбутана, 2,2,5-триметилгексана, 2,2-диметилпентана — было получено соотношение для вкладов структурных фрагментов CH_t и C_h :

$$t_{\text{св } i} = (-130 \pm 5) t + (-199 \pm 10) h \quad (12)$$

при $s_f = 43 \text{ }^\circ\text{C}$, $R^2 = 0,9716$, $n = 37$.

Огромная погрешность описания показывает, что использованная аддитивная схема совершенно

не работает для описания температуры самовоспламенения углеводородов.

Полученный отрицательный результат не является неожиданным. Известно, что аддитивные методы зачастую плохо применимы для описания химических взаимодействий. Например, энергии водородных связей, образуемых молекулами алканолов, диолов и триолов в водных растворах, не подчиняются правилам аддитивности [16]. В нашем случае температура самовоспламенения характеризует реакцию окисления горючего вещества кислородом. При этом размер молекул влияет, очевидно, на механизм реакции. Это отмечалось уже в работе [17], авторами которой установлено существование двух рядов парафиновых углеводородов, характеризующихся температурами самовоспламенения $t_{\text{св}} > 400\text{ }^{\circ}\text{C}$ и $t_{\text{св}} < 300\text{ }^{\circ}\text{C}$. Для анализа и описания температуры самовоспламенения в указанной работе [17] было введено понятие средней длины углеродной цепи, которое используется для расчета температуры самовоспламенения не только парафинов, но и ароматических углеводородов, спиртов и веществ других классов органических соединений [18]. В работе [17] не отмечены парафины, температура самовоспламенения которых находится в интервале 300–400 $^{\circ}\text{C}$.

Однако таких углеводородов достаточно много: 2,4-диметилгексан (320 $^{\circ}\text{C}$), 2,4-диметилпентан (337 $^{\circ}\text{C}$), 2,2,3,3-тетраметилгептан (358 $^{\circ}\text{C}$) и т. д., и для них характерна наибольшая зависимость температуры самовоспламенения от средней длины углеродной цепи. Можно полагать, что эти соединения составляют третью (переходную) группу парафинов наряду с выделенными в работе [17].

Для описания и прогнозирования температур самовоспламенения наиболее рациональным является использование подходов, основанных на определении средней длины углеродной цепи [18] и условной углеродной цепи [19, 20].

Выводы

Показано, что в целом для парафинов нормального строения наблюдается асимптотическая зависимость вклада связи СН метиленовой группы в температуры вспышки и самовоспламенения от размера молекул. Получено корреляционное уравнение для описания и прогнозирования температуры вспышки предельных углеводородов и их изомеров. В то же время для температуры самовоспламенения в рамках использованного подхода этого сделать не удалось.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Keshavarz M. H., Ghanbarzadeh M. Simple method for reliable predicting flash points of unsaturated hydrocarbons // Journal of Hazardous Materials. — 2011. — Vol. 193. — P. 335–341. DOI: 10.1016/j.jhazmat.2011.07.044.
2. Keshavarz M. H., Gharagheizi E., Ghanbarzadeh M. A simple correlation for prediction of autoignition temperature of various classes of hydrocarbons // Journal of the Iranian Chemical Society. — 2013. — Vol. 10, No. 3. — P. 545–557. DOI: 10.1007/s13738-012-0192-2.
3. Hukkerikar A. S., Sarup B., Kate A. T., Abildskov J., Sin G., Gani R. Group-contribution+ (GC+) based estimation of properties of pure components: Improved property estimation and uncertainty analysis // Fluid Phase Equilibria. — 2012. — Vol. 321. — P. 25–43. DOI: 10.1016/j.fluid.2012.02.010.
4. Батов Д. В. Использование аддитивно-группового метода для анализа, систематизации и прогнозирования показателей пожарной опасности горючих жидкостей // Российский химический журнал. — 2014. — Т. LVIII, № 2. — С. 4–14.
5. Батов Д. В., Мочалова Т. А., Петров А. В. Описание и прогнозирование температур вспышки сложных эфиров в рамках аддитивно-группового метода // Пожаровзрывобезопасность. — 2010. — Т. 19, № 2. — С. 15–18.
6. Батов Д. В., Мочалова Т. А., Петров А. В. Использование аддитивно-группового метода для расчета температуры вспышки спиртов, кетонов и сложных эфиров // Журнал прикладной химии. — 2011. — Т. 84, № 1. — С. 55–60.
7. Пожаровзрывоопасность веществ и материалов и средства их тушения : справ. изд.: в 2 кн.; кн. 1 / А. Н. Баратов, А. Я. Корольченко, Г. Н. Кравчук и др. — М. : Химия, 1990. — 496 с.
8. Пожаровзрывоопасность веществ и материалов и средства их тушения : справ. изд.: в 2 кн.; кн. 2 / А. Н. Баратов, А. Я. Корольченко, Г. Н. Кравчук и др. — М. : Химия, 1990. — 384 с.
9. Корольченко А. Я., Корольченко Д. А. Пожаровзрывоопасность веществ и материалов и средства их тушения : справочник: в 2 ч. — 2-е изд., перераб. и доп. — М. : Пожнаука, 2004. — Ч. I. — 713 с.
10. Корольченко А. Я., Корольченко Д. А. Пожаровзрывоопасность веществ и материалов и средства их тушения : справочник: в 2 ч. — 2-е изд., перераб. и доп. — М. : Пожнаука, 2004. — Ч. II. — 774 с.
11. Карцев В. Н., Забелин В. А., Штыкова Л. С. Межмолекулярные взаимодействия и объемные свойства жидких n-алканов и n-спиртов // Вопросы прикладной физики : межвуз. науч. сб. — Саратов : СГУ, 1998. — Вып. 4. — С. 92–94.

12. Шахпаронов М. И., Сперкач В. С. Теория вязкости жидкостей. II. Кинетический компенсационный эффект в н-алканах // Журнал физической химии. — 1980. — Т. 54, № 2. — С. 312–315.
13. Лебедев Ю. А., Мирошниченко Е. А. Термохимия парообразования органических веществ. Теплоты испарения, сублимации и давление насыщенного пара. — М.: Наука, 1981. — 216 с.
14. Абрамзон А. А., Славин А. А. Об аддитивности энергии межмолекулярного взаимодействия органических соединений по входящим в них группам // Журнал физической химии. — 1970. — Т. 44, № 3. — С. 564–569.
15. Королев Г. В., Ильин А. А., Сизов Е. А. и др. Инкременты энтальпий испарения органических соединений // Журнал общей химии. — 2000. — Т. 70, № 7. — С. 1088–1091.
16. Батов Д. В., Слюсар В. П., Тихомиров А. В., Королев В. П. Вклады групп в энтальпии сольватации одно- и многоатомных спиртов смесями воды с ацетоном, 1,4-диоксаном и метанолом в рамках аддитивно-группового подхода // Известия высших учебных заведений. Серия: химия и химическая технология. — 2005. — Т. 48, № 6. — С. 10–14.
17. Zabetakis M. G., Furno A. L., Jones G. W. Minimum spontaneous ignition temperatures of combustibles in air // Industrial & Engineering Chemistry. — 1954. — Vol. 46, No. 10. — P. 2173–2178. DOI: 10.1021/ie50538a047.
18. Корольченко А. Я. Процессы горения и взрыва. — М.: Пожнаука, 2007. — 266 с.
19. Смирнов В. В., Алексеев С. Г., Барбин Н. М., Калач А. В. Связь показателей пожарной опасности с химическим строением. XI. Галогеналканы // Пожаровзрывобезопасность. — 2013. — Т. 22, № 8. — С. 25–37.
20. Смирнов В. В., Алексеев С. Г., Барбин Н. М., Спиридонов М. А., Дальков М. П., Мокроусова О. А., Акулов А. Ю. Связь показателей пожарной опасности с химическим строением. XX. Хлоралканы (часть 2) // Пожаровзрывобезопасность. — 2015. — Т. 24, № 8. — С. 27–33. DOI: 10.18322/PVB.2015.24.08.27-33.

Материал поступил в редакцию 9 марта 2017 г.

Для цитирования: Батов Д. В., Сторонкина О. Е., Мочалова Т. А. Модификация аддитивно-группового метода для описания показателей пожарной опасности предельных углеводородов: температур вспышки и самовоспламенения, энтальпии испарения // Пожаровзрывобезопасность. — 2017. — Т. 26, № 5. — С. 21–28. DOI: 10.18322/PVB.2017.26.05.21-28.

English

MODIFICATION OF THE ADDITIVE-GROUP METHOD TO DESCRIBE THE FIRE HAZARD INDICATORS OF PARAFFIN HYDROCARBONS: FLASH POINT AND SPONTANEOUS IGNITION TEMPERATURE, VAPORATION ENTHALPY

BATOV D. V., Doctor of Chemical Sciences, Senior Researcher, Professor of State Supervision and Examination of Fires Department, Ivanovo Fire Rescue Academy of Emercom of Russia (Stroiteley Avenue, 33, Ivanovo, 153040, Russian Federation); Senior Researcher of G. A. Krestov Institute of Solution Chemistry of the RAS (Akademicheskaya St., 1, Ivanovo, 153045, Russian Federation; e-mail: bat21dv@yandex.ru)

STORONKINA O. E., Candidate of Chemical Sciences, Senior Lecturer of State Supervision and Examination of Fires Department, Ivanovo Fire Rescue Academy of Emercom of Russia (Stroiteley Avenue, 33, Ivanovo, 153040, Russian Federation)

MOCHALOVA T. A., Candidate of Biological Sciences, Deputy Head of State Supervision and Examination of Fires Department, Ivanovo Fire Rescue Academy of Emercom of Russia (Stroiteley Avenue, 33, Ivanovo, 153040, Russian Federation)

ABSTRACT

The aim of this study was to determine the relationship between flash point, spontaneous ignition temperature and vaporation enthalpy of saturated hydrocarbons with the composition and structure of their molecules in the framework of additivity of chemical bonds.

Analysis of data on flash point has shown that for saturated hydrocarbons the contribution of a methylene group CH-bond is observed as a constant for compounds, starting from dodecane. The spontaneous ignition temperature of paraffin hydrocarbons of normal structure, starting from n-nonane does not change and equal to (204 ± 2) °C. In this case the contribution of the methylene group CH-bond is formally equal to zero. Generally for normal paraffins asymptotic dependence of the contribution of the methylene group CH-bond in the flash point and spontaneous ignition temperature from the size of the molecules has been observed. It is found that some other properties of liquids (density, thermal coefficient of volume expansion) also reveal the asymptotic dependence from the molecular size. In the present study, we exploit the exponential model with three fitting coefficients to describe the asymptotic dependence of the flash point and spontaneous ignition temperature of saturated hydrocarbons. The corresponding correlation equations have been obtained.

It has been suggested that the same type of dependencies caused by various reasons. The asymptotic dependence of the flash point temperature, associated mainly with the process of partial evaporation of the liquid, due to competition of intermolecular and intramolecular interactions in the liquid phase. The asymptotic dependence of the spontaneous ignition temperature of hydrocarbons related to the substance oxidation process, caused by the change of the mechanism of chemical interaction.

The analysis of literature data has shown that there is a good linear dependence of the vaporization enthalpies of n-alkanes at 25 °C from the size of their molecules. Therefore, the contribution of methylene groups and the structural fragment CH_2 in the vaporization enthalpy is constant, regardless of the size of the molecule of the n-alkanes.

The regression equation for describing and predicting the flash point of paraffin hydrocarbons and their isomers has been obtained. For the spontaneous ignition temperature in the framework of the used approach it has not been made.

Keywords: fire hazard indicators; flash point; spontaneous ignition temperature; vaporization enthalpy; additive-group method; structural fragments; asymptotic dependence; paraffin hydrocarbons; intermolecular interactions; intramolecular interactions.

REFERENCES

1. Keshavarz M. H., Ghanbarzadeh M. Simple method for reliable predicting flash points of unsaturated hydrocarbons. *Journal of Hazardous Materials*, 2011, vol. 193, pp. 335–341. DOI: 10.1016/j.jhazmat.2011.07.044.
2. Keshavarz M. H., Gharagheizi E., Ghanbarzadeh M. A simple correlation for prediction of autoignition temperature of various classes of hydrocarbons. *Journal of the Iranian Chemical Society*, 2013, vol. 10, no. 3, pp. 545–557. DOI: 10.1007/s13738-012-0192-2.
3. Hukkerikar A. S., Sarup B., Kate A. T., Abildskov J., Sin G., Gani R. Group-contribution+ (GC+) based estimation of properties of pure components: Improved property estimation and uncertainty analysis. *Fluid Phase Equilibria*, 2012, vol. 321, pp. 25–43. DOI: 10.1016/j.fluid.2012.02.010.
4. Batov D. V. The use of additive-group method for analysis, systematization and predicting of the flammable liquids hazards parameters. *Rossiyskiy khimicheskiy zhurnal / Russian Journal of General Chemistry*, 2014, vol. LVIII, no 2, pp. 4–14 (in Russian).
5. Batov D. V., Mochalova T. A., Petrov A. V. Description and prediction of flash temperature of esters within the limits of additive-group method. *Pozharovzryvobezopasnost / Fire and Explosion Safety*, 2010, vol. 19, no. 2, pp. 15–18 (in Russian).
6. Batov D. V., Mochalova T. A., Petrov A. V. Additive group techniques for calculating the flash point of alcohols, ketones and esters. *Russian Journal of Applied Chemistry*, 2011, vol. 84, no. 1, pp. 54–59. DOI: 10.1134/S1070427211010095.
7. Baratov A. N., Korolchenko A. Ya., Kravchuk G. N. et al. *Pozharovzryvoopasnost veshchestv i materialov i sredstva ikh tusheniya. Sprav. izd.* [Fire and explosion hazard of substances and materials and means of their extinguishing. Reference book]. Moscow, Khimiya Publ., 1990. Book 1, 496 p. (in Russian).
8. Baratov A. N., Korolchenko A. Ya., Kravchuk G. N. et al. *Pozharovzryvoopasnost veshchestv i materialov i sredstva ikh tusheniya. Sprav. izd.* [Fire and explosion hazard of substances and materials and means of their extinguishing. Reference book]. Moscow, Khimiya Publ., 1990. Book 2, 384 p. (in Russian).
9. Korolchenko A. Ya., Korolchenko D. A. *Pozharovzryvoopasnost veshchestv i materialov i sredstva ikh tusheniya. Spravochnik. 2-e izd.* [Fire and explosion hazard of substances and materials and means of their extinguishing. Reference book. 2nd ed.]. Moscow, Pozhnauka Publ., 2004. Part I, 713 p. (in Russian).

10. Korolchenko A. Ya., Korolchenko D. A. *Pozharovzryvoopasnost veshchestv i materialov i sredstva ikh tusheniya. Spravochnik. 2-e izd.* [Fire and explosion hazard of substances and materials and means of their extinguishing. Reference book. 2nd ed.]. Moscow, Pozhnauka Publ., 2004. Part II, 774 p. (in Russian).
11. Kartsev V. N., Zabelin V. A., Shtykova L. S. Intermolecular interactions and volumetric properties of n-alkanes and n-alcohols. *Voprosy prikladnoy fiziki / Questions of Applied Physics*. Saratov, Saratov State University Publ., 1998, issue 4, pp. 92–94 (in Russian).
12. Shakhparonov M. I., Sperkach V. S. Theory of viscosity of liquids. II. Kinetic compensation effect in n-alkanes. *Zhurnal fizicheskoy khimii / Russian Journal of Physical Chemistry A*, 1980, vol. 54, no. 2, pp. 312–315 (in Russian).
13. Lebedev Yu. A., Miroshnichenko E. A. *Termokhimiya paroobrazovaniya organicheskikh veshchestv. Teploty ispareniya, sublimatsii i davleniye nasyshchennogo para* [Thermochemistry of vaporization of organic substances. The heat of vaporization, sublimation, and vapor pressure]. Moscow, Nauka Publ., 1981. 216 p. (in Russian).
14. Abramzon A. A., Slavin A. A. About the additivity of intermolecular interaction energy of organic compounds within the constituents of their groups. *Zhurnal fizicheskoy khimii / Russian Journal of Physical Chemistry A*, 1970, vol. 44, no. 3, pp. 564–569 (in Russian).
15. Korolev G. V., Il'in A. A., Sizov E. A., Solov'ev M. E., Mogilevich M. M. The increments of the vaporization enthalpy of organic compounds. *Zhurnal obshchey khimii / Russian Journal of General Chemistry*, 2000, vol. 70, no. 7, pp. 1088–1091 (in Russian).
16. Batov D. V., Slyusar V. P., Tihomirov A. V., Korolev V. P. Group contributions to the solvation enthalpy of one- and polyatomic alcohols by mixtures of water with acetone, 1,4-dioxane and methanol within additive-group approach. *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedeniy. Seriya: Khimiya i khimicheskaya tekhnologiya / Higher Educational Institutions News. Chemistry and Chemical Technology*, 2005, vol. 48, no. 6, pp. 10–14 (in Russian).
17. Zabetakis M. G., Furno A. L., Jones G. W. Minimum spontaneous ignition temperatures of combustibles in air. *Industrial & Engineering Chemistry*, 1954, vol. 46, no. 10, pp. 2173–2178. DOI: 10.1021/ie50538a047.
18. Korolchenko A. Ya. *Processy goreniya i vzryva* [The processes of combustion and explosion]. Moscow, Pozhnauka Publ., 2007. 266 p. (in Russian).
19. Smirnov V. V., Alexeev S. G., Barbin N. M., Kalach A. V. Correlation of fire hazard characteristics with chemical structure. XI. Haloalkanes. *Pozharovzryvbezopasnost / Fire and Explosion Safety*, 2013, vol. 22, no. 8, pp. 25–37 (in Russian).
20. Smirnov V. V., Alexeev S. G., Barbin N. M., Spiridonov M. A., Dalkov M. P., Mokrousova O. A., Akulov A. Yu. Correlation of fire hazard characteristics with chemical structure. XX. Chloroalkanes (Part 2). *Pozharovzryvbezopasnost / Fire and Explosion Safety*, 2015, vol. 24, no. 8, pp. 27–33 (in Russian). DOI: 10.18322/PVB.2015.24.08.27-33.

For citation: Batov D. V., Storonkina O. E., Mochalova T. A. Modification of the additive-group method to describe the fire hazard indicators of paraffin hydrocarbons: flash point and spontaneous ignition temperature, vaporation enthalpy. *Pozharovzryvbezopasnost / Fire and Explosion Safety*, 2017, vol. 26, no. 5, pp. 21–28 (in Russian). DOI: 10.18322/PVB.2017.26.05.21-28.

Е. Н. ПОКРОВСКАЯ, д-р техн. наук, профессор, профессор кафедры комплексной безопасности в строительстве, Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет (Россия, 129337, г. Москва, Ярославское шоссе, 26; e-mail: elenapokrovskaya@bk.ru)

Ф. А. ПОРТНОВ, канд. техн. наук, ассистент кафедры комплексной безопасности в строительстве, Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет (Россия, 129337, г. Москва, Ярославское шоссе, 26)

УДК 699.8:614.8+544+630.3

ТЕРМОДИНАМИЧЕСКАЯ ОПТИМИЗАЦИЯ МОДИФИКАТОРОВ ПОВЕРХНОСТНОГО СЛОЯ ДРЕВЕСИНЫ

Изучена модификация древесины эфирами фосфористой кислоты в целях уменьшения пожароопасных свойств. Отмечено, что выбор эффективных модификаторов поверхностного слоя является наиболее важной задачей при обеспечении огнезащитности древесины и что для правильного выбора необходимо знать оптимальные характеристики модификаторов, позволяющие оценивать их эффективность. Определены термодинамические параметры поверхности модифицированной древесины. Обоснованы высокие значения свободной поверхностной энергии при изучении структуры поверхности и поверхностного слоя модифицированной древесины. Показана связь энергетических характеристик поверхности модифицированной древесины, эффективности модификаторов поверхностного слоя, структуры поверхностного слоя и пожароопасных характеристик древесины. На основании полученных данных показана возможность термодинамической оптимизации модификаторов при создании защитных составов.

Ключевые слова: древесина; модифицирование; термодинамика; поверхностный слой; фосфорорганические соединения; оптимизация.

DOI: 10.18322/PVB.2017.26.05.29-36

Введение

Модифицирование является эффективным способом улучшения эксплуатационных характеристик строительных материалов, в том числе древесины [1–4]. Различают механическое, термическое и химическое модифицирование. Технологически наиболее простым и доступным является поверхностное химическое модифицирование, которое позволяет снизить пожароопасность и гидрофильность материалов и конструкций, повысить сопротивление биокоррозии. Эффективность поверхностного химического модифицирования определяется выбором модификатора, который, вступая в реакцию переэтификации с компонентами древесины, обуславливает долговечность приобретенных эксплуатационных свойств [5, 6].

Для эффективного модифицирования очень важен выбор модификатора, что является наиболее важной и трудной задачей.

Естественно, что при поверхностном модифицировании свойства поверхности влияют на эффективность процесса модифицирования. Энергетические свойства характеризуются изменением термодинамических характеристик, таких как краевой угол смачивания, поверхностное натяжение и изменение

изобарно-изотермического потенциала поверхности при модифицировании.

Фактором, влияющим на интенсивность поверхностной энергии, является поверхностное натяжение [7]. Расчет изменения изобарно-изотермического потенциала модифицированной поверхности производился на основании объединенного уравнения I и II начал термодинамики [7–12].

Для оценки свободной поверхностной энергии для систем с постоянным химическим составом также используется объединенное уравнение I и II начал термодинамики, имеющее вид:

$$dG = -SdT + Vdp + \sigma dS_{уд} + \mu dn, \quad (1)$$

где G — энергия Гиббса;

S — энтропия системы;

T — температура системы;

V — объем системы;

p — давление системы;

σ — поверхностное натяжение (работа образования единицы площади поверхности);

$S_{уд}$ — удельная площадь поверхности;

μ — химический потенциал вещества, составляющего конденсированную фазу;

n — число молей.

При изобарно-изотермических условиях и постоянном количестве вещества уравнение (1) имеет вид:

$$dG = \sigma dS_{уд} \quad (2)$$

Поверхностное натяжение твердого тела представляет собой меру энергии единицы площади поверхности материала. Так как изменение изобарно-изотермического потенциала является функцией состояния системы, ее полный дифференциал выражается уравнением

$$\Delta G = \sigma dS_{уд} + S_{уд} d\sigma \quad (3)$$

Изучение поверхностного модифицирования древесины дает возможность заранее оценить эффективность модификаторов поверхностного слоя с помощью термодинамических характеристик (ΔG , σ).

Наиболее рациональным путем для выбора модификаторов, снижающих пожароопасные свойства материалов, является выбор оптимальных характеристик, позволяющих оценивать эффективность системы *подложка – модификатор*, что является **целью** работы.

Для достижения цели были поставлены следующие **задачи**: изучение изменения энергетических характеристик поверхности древесины на примере ее модифицирования эфирами фосфористой кислоты; изучение термодинамической оптимизации модификаторов, снижающих пожароопасные свойства материалов.

Методы исследования

Оценка характеристик модифицированной древесины проводилась экспериментальным путем.

Химический состав определялся на сканирующем микроскопе Quanta 200 с приставкой для элементного анализа Apollo 40 методом энергодисперсионной спектроскопии [13], что позволяло получать изображения высокой четкости с увеличением более чем в 100000 крат [14, 15]. Во время испытаний проводилась оценка процентного содержания фосфора в образцах модифицированной древесины.

Методом нейтральной капли на установке Easy Drop DSA25S были получены данные по величине краевого угла смачивания θ (град) образцов модифицированной древесины [16]. Установка состоит из держателя образца, механизма подачи жидкости через шприц и камеры высокой четкости, которая обеспечивает фиксацию момента соприкосновения капли жидкости с образцом.

Для определения удельной площади поверхности исходной и модифицированной древесины был использован прибор Quantachrome NOVA 4200e [17] и метод Брюнера – Эммета – Теллера (БЕТ), на основе которого измеряется масса газа, адсорбированного образцом, после процедуры дегазации [18].

Сущность метода по определению группы огнезащитной эффективности огнезащитных составов [18] заключается в определении потери массы образцом Δm (%) древесины, обработанной испытываемыми составами, при огневом воздействии продолжительностью 2 мин. Методом экспериментального определения коэффициента дымообразования твердых веществ и материалов (ГОСТ Р 53292–2009) была проведена оценка дымообразующей способности образцов модифицированной древесины.

Экспериментальная часть

Термодинамические характеристики определялись на образцах древесины заболони сосны размером $40 \times 40 \times 10$ мм, с влажностью 8 %. В качестве модификаторов были использованы 20 %-ные растворы эфиров фосфористой кислоты — диметилфосфита (ДМФ), диэтилфосфита (ДЭФ), дипропилфосфита (ДПФ), дибутилфосфита (ДБФ) и дифенилфосфита (ДФФ) (рис. 1). В литературе [3, 4] отмечено увеличение огнезащитности древесины при модифицировании ее указанными модификаторами.

Задача работы состояла в определении изменения изобарно-изотермического потенциала поверхности модифицированной древесины в зависимости от модификаторов поверхностного слоя, а также в установлении связи энергетических характеристик с физико-химическими свойствами модифицированных образцов.

Модификаторы наносились на поверхность образцов в два слоя при температуре $20\text{--}25$ °C с расходом 300 г/м^2 . Для удаления избыточного количества модификатора, не связанного химическими связями с поверхностью, проводилась экстракция образцов в аппаратах Сокслета (растворитель — ацетон, вода).

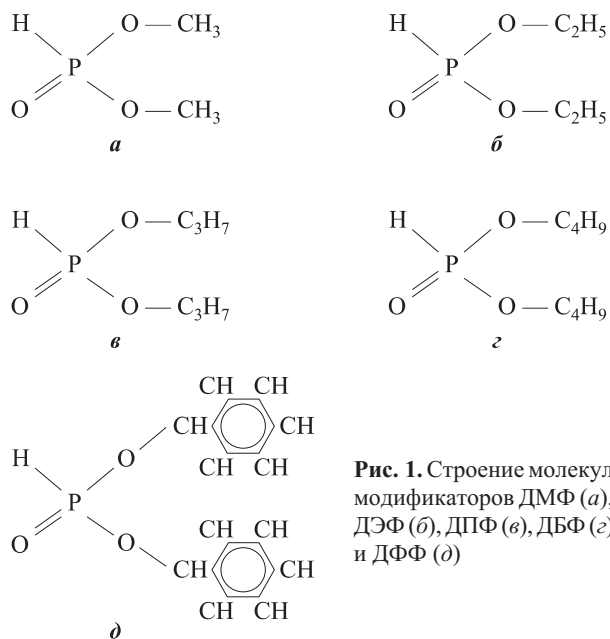


Рис. 1. Строение молекул модификаторов ДМФ (а), ДЭФ (б), ДПФ (в), ДБФ (з) и ДФФ (д)

Таблица 1. Содержание фосфора в поверхностном слое модифицированной древесины

Модификатор	ДМФ	ДЭФ	ДПФ	ДБФ	ДФФ
Содержание Р до термического разложения, %	2,87	3,57	2,6	2,65	2,45

Таблица 2. Значения $\sigma_{кр}$ и $S_{уд}$ для разных модификаторов

Показатель	Модификатор поверхностного слоя					
	Эталон	ДМФ	ДЭФ	ДПФ	ДБФ	ДФФ
$\sigma_{кр} \cdot 10^3$, Н/м	25,33	19,91	25,03	21,97	24,19	23,03
$S_{уд}$, см ² /г	42,52	58,56	17,081	71,49	70,37	18,289

Сушка образцов осуществлялась в сушильном шкафу при температуре 40 °С в течение 6 ч, после чего образцы помещались в эксикатор над безводным CaCl_2 и высушивались при температуре 25 °С в течение 7 сут.

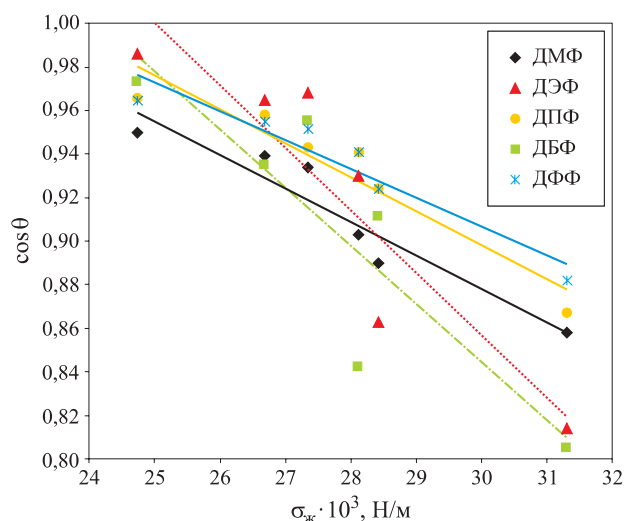
Степень химического взаимодействия модификаторов в поверхностном слое древесины устанавливалась по процентному содержанию фосфора (Р) в образцах после экстракции (табл. 1).

Поверхностное натяжение σ (Н/м) определялось методом нейтральной капли [9, 10] на установке Easy Drop с использованием соответствующего программного обеспечения. Значения удельной площади поверхности $S_{уд}$ образцов древесины получены на установке NOVA Chrome 2200 методом сорбции азота [16–18] (табл. 2).

На установке Easy Drop получена зависимость краевого угла смачивания от стандартного поверхностного натяжения $\sigma_{ж}$ (Н/м) капли водно-этанольного раствора различной концентрации $\cos \theta = f(\sigma_{ж})$ в виде усредненной прямой (рис. 2).

Экстраполируя уравнение прямой до $\cos \theta = 1$, можно определить критическое значение поверхностного натяжения $\sigma_{кр}$, которое является характеристикой поверхностной энергии единицы площади поверхности (см. табл. 2).

Поверхность образцов модифицированной древесины также изучалась методом электронной микроскопии с использованием растрового электронного микроскопа JSM-840 [14, 15]. Снимки поверхности

**Рис. 2.** Зависимость $\cos \theta = f(\sigma_{ж})$ при использовании различных модификатора

модифицированной древесины с увеличением 300 крат показаны на рис. 3.

На полученных снимках видно, что поверхность древесины меняется в зависимости от величины алкильного радикала групп $-\text{OR}$ в эфирах фосфористой кислоты. При использовании модификаторов с радикалами $-\text{C}_3\text{H}_7$, $-\text{C}_4\text{H}_9$, $-\text{C}_6\text{H}_5$ (ДПФ, ДБФ, ДФФ) обеспечивается сплошное укрывание поверхности древесины. При применении модификаторов с радикалами $-\text{CH}_3$, $-\text{C}_2\text{H}_5$ (ДМФ, ДЭФ) происходит ориентированное выстилание структуры капилляров и возможно выстилание внутренней поверхности капилляров. При эффективном химическом модифицировании наблюдается укрепление стенок капилляров модификатором, что приводит к сокращению пор и уменьшению адсорбции.

Для оценки эксплуатационных характеристик исходной (эталон) и модифицированной древесины были получены данные по ее дымообразующей способности древесины D_m (м²/кг) (ГОСТ 12.1.044–89*), потере массы при горении Δm (%) (ГОСТ Р 53292–2009) и сорбции паров воды a_m (%) [19–21] (табл. 3).

На основании полученных данных по параметрам $S_{уд}$ и $\sigma_{кр}$ (см. табл. 2) производился расчет изменения изобарно-изотермического потенциала единицы площади поверхности модифицированных образцов (рис. 4).

Таблица 3. Пожароопасные свойства и сорбция паров воды исходной и модифицированной древесины

Показатель	Модификатор поверхностного слоя					
	Эталон	ДМФ	ДЭФ	ДПФ	ДБФ	ДФФ
D_m , м ² /кг	1010–1050	450–470	130–140	640–680	600–640	740–780
Δm , %	79,0	6,9	8,5	12,3	11,5	9,5
a_m , %	421,1	215,8	155,5	221,9	193,4	163,52

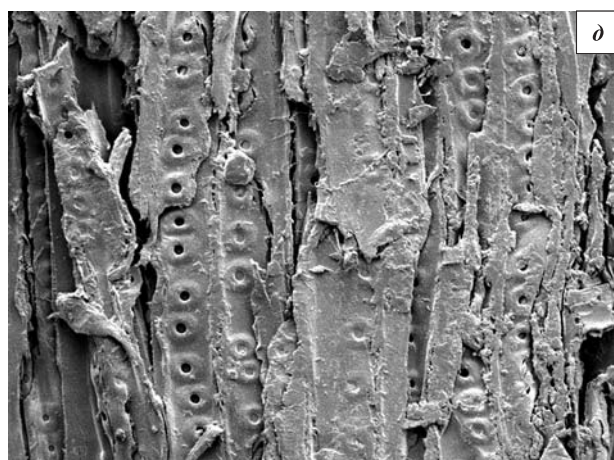
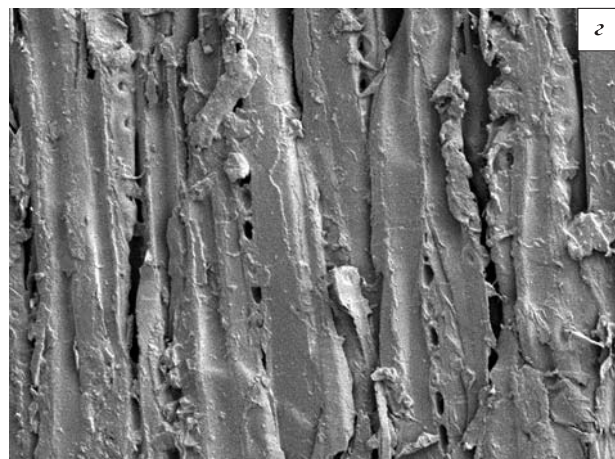
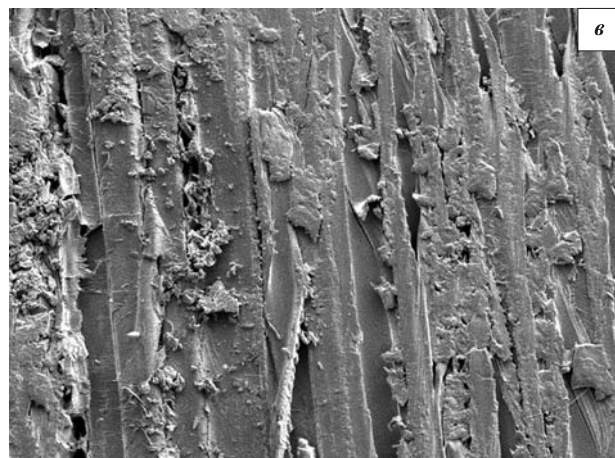
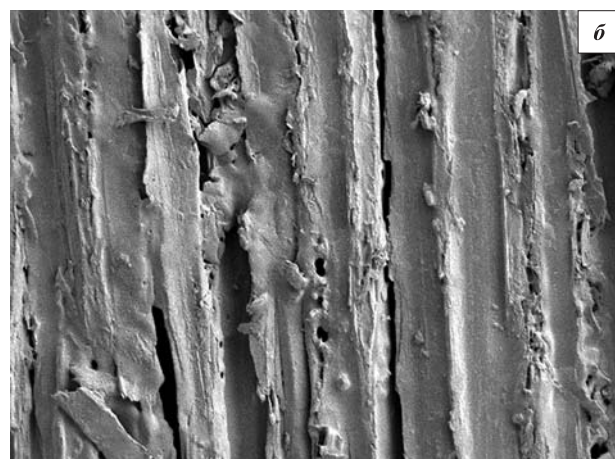
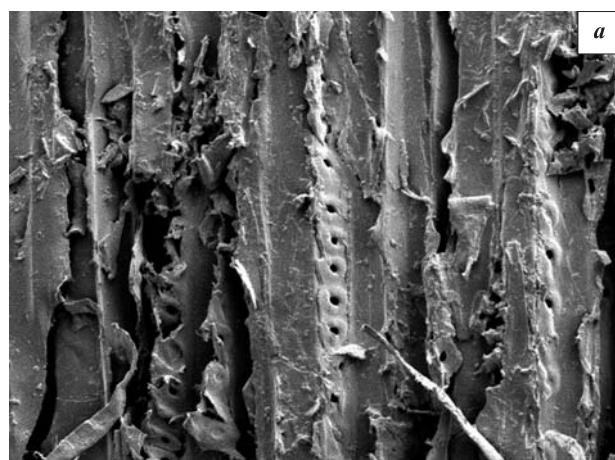


Рис. 3. Снимки поверхности древесины, модифицированной ДМФ (а), ДЭФ (б), ДПФ (в), ДБФ (з) и ДФФ (д), полученные методом электронной микроскопии

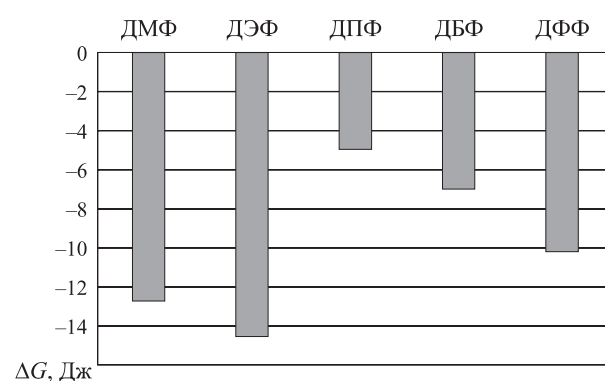


Рис. 4. Изменение изобарно-изотермического потенциала ΔG поверхности модифицированной древесины

Как видно из рис. 4, все значения ΔG ниже 0, что характеризует самопроизвольное протекание процесса поверхностного модифицирования в данных условиях. Наиболее отрицательные значения изменения изобарно-изотермического потенциала поверхности модифицированной древесины характерны для случая использования в качестве модификатора ДЭФ, который в большей степени вступает в химическое взаимодействие с лигноуглеводным комплексом. Термодинамические характеристики модифицирования зависят от степени химического взаимодействия подложки с модификатором.

Выводы

При поверхностном модифицировании древесины 20 %-ными растворами эфиров фосфористой кислоты происходит самопроизвольное химическое взаимодействие фосфорсодержащих соединений с подложкой древесины. Наибольшая степень химического взаимодействия характерна для ДЭФ, наименьшая — для ДФФ. При этом при модифицировании древесины ДЭФ происходит выстилание

ее поверхности модификатором. Кроме того, на основании данных по удельной площади поверхности $S_{уд}$ можно сделать вывод о химическом модифицировании внутренней части капилляров этим модификатором. Укрепление поверхности и капиллярной структуры при химическом модифицировании фосфорсодержащими соединениями приводит к снижению пожарной опасности и дымообразующей способности древесины.

Все полученные данные коррелируются с данными изменения изобарно-изотермического потенциала (ΔG). Наиболее низкие значения ΔG харак-

теризуют поверхность древесных материалов с меньшими показателями пожарной опасности.

Таким образом, определен метод термодинамической оптимизации древесины в целях улучшения ее эксплуатационных характеристик, что позволит производить выбор наиболее эффективных модификаторов по величине ΔG . Исходя из доступности данного метода можно говорить о его высокой практической значимости. Оценка эффективности других классов модификаторов на основе данного метода будет являться предметом дальнейших исследований.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Покровская Е. Н., Портнов Ф. А., Кобелев А. А., Корольченко Д. А. Дымообразующая способность и токсичность продуктов сгорания древесных материалов при поверхностном модифицировании элементоорганическими соединениями // Пожаровзрывобезопасность. — 2013. — Т. 22, № 10. — С. 40–45.
2. Стенин А. А. Улучшение свойств строительных материалов из древесины за счет модификации ее поверхности // Строительство — формирование среды жизнедеятельности : сборник докладов XVI Международной межвузовской научно-практической конференции студентов, магистрантов, аспирантов и молодых ученых. — М. : МГСУ, 2013. — С. 553–559.
3. Шамаев В. А. Современное состояние и пути развития модифицированной древесины // Современные проблемы механической технологии древесины : материалы международной научно-практической конференции. — СПб., 2010. — С. 11–17.
4. Тарива Е. Ю. Влияние вида модификатора на физико-механические свойства древесины // Актуальные проблемы строительства и строительной индустрии : сборник материалов VI Международной научно-технической конференции. — Тула, 2005. — С. 55–56.
5. Покровская Е. Н. Сохранение памятников деревянного зодчества с помощью элементоорганических соединений. — М. : Изд-во АСВ, 2009. — 136 с.
6. Покровская Е. Н. Химико-физические основы увеличения долговечности древесины. — М. : Изд-во АСВ, 2003. — 104 с.
7. Ролдугин В. И. Физико-химия поверхности : учебник-монография. — Долгопрудный : Изд. дом "Интеллект", 2011. — 564 с.
8. Tutygin A. S., Shinkaruk A. A., Aisenstadt A. M., Lesovik V. S. Ecological risks reduction in the production of concrete composites // Journal of International Scientific Publications: Ecology and Safety. — 2014. — Vol. 8. — P. 54–61.
9. Tutygin A. S., Shinkaruk A. A., Aisenstadt A. M., Frolova M. A., Pospelova T. A. Ways to increase and monitor bearing capacity of soils // Journal of International Scientific Publications: Ecology and Safety. — 2013. — Vol. 7, Part 1. — P. 37–45.
10. Айзенштадт А. М. Термодинамическая оптимизация состава нанокompозитов горных пород // Инновационные материалы и технологии для строительства в экстремальных климатических условиях : материалы I Всероссийской научно-технической конференции. — Архангельск : САФУ, 2014. — С. 37–44.
11. Дерягин Б. В., Абрикосова И. И., Лифшиц Е. М. Молекулярное притяжение конденсированных тел // Успехи физических наук. — 1958. — Т. LXIV, вып. 3. — С. 493–528.
12. Дерягин Б. Д., Чураев Н. В. Смачивающие пленки. — М. : Наука, 1984. — 60 с.
13. Практические методы в электронной микроскопии / Под ред. Одри М. Глоэра; пер. с англ. — Л. : Машиностроение, 1980. — 375 с.
14. Практическая растровая электронная микроскопия / Под ред. Дж. Гоулдстейна, Х. Яковица; пер. с англ. — М. : Мир, 1978. — 656 с.
15. Калинин Б. А. Растровая электронная микроскопия : лабораторная работа. — М. : МИФИ, 2008. — 56 с.
16. Абрамзон А. А., Боброва Л. Е., Зайченко Л. П. Поверхностные явления и поверхностно-активные вещества : справочник. — Л. : Химия, 1984. — 392 с.

17. Вячеславов А. С., Померанцева Е. А. Измерение площади поверхности и пористости методом капиллярной конденсации азота (подготовка магистров — операторов современного научного оборудования) : методическая разработка. — М. : МГУ им. М. В. Ломоносова, 2006. — 55 с.
18. Подкаменный Ю. А., Носенко А. А. Инновационный метод определения удельной поверхности дисперсных систем и пористых материалов // Молодежь и наука : сборник материалов IX Всероссийской научно-технической конференции студентов, аспирантов и молодых ученых с международным участием, посвященной 385-летию со дня основания г. Красноярска. — Красноярск : Сибирский федеральный университет, 2013. — 3 с. URL: <http://conf.sfu-kras.ru/sites/mn2013/thesis/s060/s060-017.pdf> (дата обращения: 01.03.2017).
19. Кельцев Н. В. Основы адсорбционной техники. — М. : Мир, 1984. — 592 с.
20. Грег С., Синг К. Адсорбция, удельная поверхность, пористость / Пер. с англ.; 2-е изд. — М. : Мир, 1984. — 306 с.
21. Ruthven D. M. Principles of adsorption and adsorption processes. — New York etc. : John Wiley & Sons, 1984. — 443 p.

Материал поступил в редакцию 21 марта 2017 г.

Для цитирования: Покровская Е. Н., Портнов Ф. А. Термодинамическая оптимизация модификаторов поверхностного слоя древесины // Пожаровзрывобезопасность. — 2017. — Т. 26, № 5. — С. 29–36. DOI: 10.18322/PVB.2017.26.05.29-36.

English

THERMODYNAMIC OPTIMIZATION OF MODIFIERS OF THE SURFACE LAYER OF WOOD

POKROVSKAYA E. N., Doctor of Technical Sciences, Full Professor, Professor of Department of Complex Safety in Construction, National Research Moscow State University of Civil Engineering (Yaroslavskoye Shosse, 26, Moscow, 129337, Russian Federation; e-mail: elenapokrovskaya@bk.ru)

PORTNOV F. A., Candidate of Technical Sciences, Assistant of Department of Complex Safety in Construction, National Research Moscow State University of Civil Engineering (Yaroslavskoye Shosse, 26, Moscow, 129337, Russian Federation)

ABSTRACT

A study is a modification of wood with phosphorous acid esters in order to reduce fire properties. It is known that phosphorus-containing modifiers are effective flame retardants for wood. Finding the best characteristics to evaluate effectiveness of modifiers is the most rational way to select modifiers, which reduce the fire properties of materials. A significant characteristic for evaluation of effectiveness of surface layer modifiers is a surface energy. To achieve the goal, the task was to study the change of energy characteristics of the modified wood surface and study of thermodynamic optimization of modifiers, which reduce the fire properties of materials. The thermodynamic parameters of the modified wood surface were determined on the basis of which it is possible to select the modifiers of the surface layer for wood. The change of the isothermal-isobaric ensemble of the modified surface was calculated on the basis of the combined equations I and II of the laws of thermodynamics using the “neutral drop” method. The largest values of surface energy are characteristic for wood, which modified by compounds entering into effective chemical interaction with wood. The degree of chemical interaction of the modifiers with wood was studied by the elemental analysis. High values of surface energy are substantiated when studying the structure of the surface and the surface layer of modified wood. The structure of the surface of the wood was studied by electron microscopy. The capillary structure of wood was studied by the method of sorption of water vapor. It is shown that with a high degree of interaction of the modifier with wood, the surface porous layer of wood is strengthened and structured and the pore size is reduced. As a result, there is a reduction in fire hazard and smoke generation ability. The most effective modifier is DEF, which provides the I group of flame retardant efficiency and reduces the smoke generation ability by 6 times. The possibility of the thermodynamic optimization of modifiers to create flame retardants was shown.

The most effective modifiers providing high fire resistance of wood are characterized by the most negative values of the isothermal-isobaric ensemble change.

Keywords: wood; modification; thermodynamics; surface layer; organophosphorus compounds; optimization.

REFERENCES

1. Pokrovskaya E. N., Portnov F. A., Kobelev A. A., Korolchenko D. A. The smoke generation property and combustion products toxicity of wood which was modified by organoelemental compounds. *Pozharovzryvobezopasnost / Fire and Explosion Safety*, 2013, vol. 22, no. 10, pp. 40–45 (in Russian).
2. Stenin A. A. Improving the properties of building materials from wood by modifying its surface. In: *Stroitelstvo — formirovaniye sredy zhiznedeyatel'nosti. Sbornik dokladov XVI Mezhdunarodnoy mezhvuzovskoy nauchno-prakticheskoy konferentsii studentov, magistrantov, aspirantov i molodykh uchennykh* [Construction — the Formation of the Environment of Life. Collection of Reports of XVI International Interuniversity Scientific-Practical Conference of Students, Undergraduates, Graduate Students and Young Scientists]. Moscow, MGSU Publ., 2013, pp. 553–559 (in Russian).
3. Shamaev V. A. Current state and ways of development of modified wood. In: *Sovremennyye problemy mekhanicheskoy tekhnologii drevesiny. Materialy mezhdunarodnoy nauchno-tekhnicheskoy konferentsii* [Modern Problems of the Mechanical Wood Technology. Proceedings of International Scientific and Practical Conference]. Saint Petersburg, 2010, pp. 11–17 (in Russian).
4. Tariva E. Yu. Influence of the type of modifier on the physical and mechanical properties of wood. In: *Aktualnyye problemy stroitelstva i stroitel'noy industrii. Sbornik materialov VI Mezhdunarodnoy nauchno-tekhnicheskoy konferentsii* [Actual Problems of Construction and Construction Industry. Proceedings of VI International Scientific and Technical Conference]. Tula, 2005, pp. 55–56 (in Russian).
5. Pokrovskaya E. N. *Sokhraneniye pamyatnikov derevyannogo zodchestva s pomoshchyu elementoorganicheskikh soyedineniy* [Preservation of monuments of wooden architecture with the help of organoelement compounds]. Moscow, ASV Publ., 2009. 136 p. (in Russian).
6. Pokrovskaya E. N. *Khimiko-fizicheskiye osnovy uvelicheniya dolgovechnosti drevesiny* [Chemical and physical basis for increasing the longevity of wood]. Moscow, ASV Publ., 2003. 104 p. (in Russian).
7. Roldugin V. I. *Fiziko-khimiya poverkhnosti* [Physicochemistry of the surface]. Dolgoprudnyy, Intellect Publ., 2011. 564 p. (in Russian).
8. Tutugin A. S., Shinkaruk A. A., Aisenstadt A. M., Lesovik V. S. Ecological risks reduction in the production of concrete composites. *Journal of International Scientific Publications: Ecology and Safety*, 2014, vol. 8, pp. 54–61.
9. Tutugin A. S., Shinkaruk A. A., Aisenstadt A. M., Frolova M. A., Pospelova T. A. Ways to increase and monitor bearing capacity of soils. *Journal of International Scientific Publications: Ecology and Safety*, 2013, vol. 7, part 1, pp. 37–45.
10. Ayzenshtadt A. M. Thermodynamic optimization of the composition of rocks nanocomposites. In: *Innovatsionnyye materialy i tekhnologii dlya stroitelstva v ekstremal'nykh klimaticheskikh usloviyakh. Materialy I Vserossiyskoy nauchno-tekhnicheskoy konferentsii* [Innovative Materials and Technologies for building industry in extreme climate. Proceedings of I All-Russian International Scientific and Technical Conference]. Arkhangelsk, Northern (Arctic) Federal University Publ., 2014, pp. 37–44 (in Russian).
11. Deryagin B. V., Abrikosova I. I., Lifshits E. M. Molecular attraction of condensed bodies. *Uspekhi fizicheskikh nauk / Advances in Physical Sciences*, 1958, vol. LXIV, no. 3, pp. 493–528 (in Russian).
12. Deryagin B. V., Churaev N. V. *Smachivayushchiye plenki* [Wetting membranes]. Moscow, Nauka Publ., 1984. 60 p. (in Russian).
13. Glauert A. M. (ed.). *Practical methods in electron microscopy*, vol. 2. New York, American Elsevier Publ. Co., Inc., 1974. (Russ. ed.: Glauert A. M. (ed.). *Prakticheskiye metody v elektronnoy mikroskopii*. Leningrad, Mashinostroyeniye Publ., 1980. 375 p.).
14. Goldstein J. I., Yakowitz H. (eds.). *Practical scanning electron microscopy*. New York – London, Plenum Press, 1975. 582 p. DOI: 10.1007/978-1-4613-4422-3 (Russ. ed.: Goldstein J. I., Yakowitz H. (eds.). *Prakticheskaya rastrovaya elektron'naya mikroskopiya*. Moscow, Mir Publ., 1978. 656 p.).
15. Kalin B. A. *Rastrovaya elektron'naya mikroskopiya. Laboratornaya rabota* [Raster electron microscopy. Laboratory work]. Moscow, MIFI Publ., 2008. 56 p. (in Russian).
16. Abramzon A. A., Bobrova L. E., Zaychenko L. P. *Poverkhnostnyye yavleniya i poverkhnostno-aktivnyye veshchestva. Spravochnik* [Surface phenomena and surface-active substances. Handbook]. Leningrad, Khimiya Publ., 1984. 392 p. (in Russian).

17. Vyacheslavov A. S., Pomerantseva E. A. *Izmereniye ploshchadi poverkhnosti i poristosti metodom kapillyarnoy kondensatsii azota (podgotovka magistrów — operatorów sovremennogo nauchnogo oborudovaniya): metodicheskaya razrabotka* [Measurement of surface area and porosity by the method of capillary nitrogen condensation (preparation of masters — operators of modern scientific equipment). Methodological development]. Moscow, Moscow State University by M. V. Lomonosov Publ., 2006. 55 p. (in Russian).
18. Podkamenny Yu. A., Nosenko A. A. Innovative method for determining the specific surface area of disperse systems and porous materials. In: *Molodezh i nauka. Sbornik materialov IX Vserossiyskoy nauchno-tekhnicheskoy konferentsii studentov, aspirantov i molodykh uchenykh s mezhdunarodnym uchastiyem, posvyashchennoy 385-letiyu so dnya osnovaniya Krasnoyarska* [All-Russian Scientific and Technical Conference of Students, Graduate Students and Young Scientists with International Participation, Dedicated to the 385th Anniversary of the Founding of Krasnoyarsk]. Krasnoyarsk, Siberian Federal University, 2013. 3 p. (in Russian). Available at: <http://conf.sfu-kras.ru/sites/mn2013/thesis/s060/s060-017.pdf> (Accessed 1 March 2017).
19. Keltsev N. V. *Osnovy adsorbtsionnoy tekhniki* [Basics of adsorption technique]. Moscow, Mir Publ., 1984. 592 p. (in Russian).
20. Gregg S. J., Sing K. S. W. *Adsorption, surface area and porosity*. 2nd ed. London – New York, Academic Press, 1982. 304 p. (Russ. ed.: Gregg S., Sing K. Adsorbtsiya, udelnaya poverkhnost, poristost. Moscow, Mir Publ. 1984. 306 p.).
21. Ruthven D. M. *Principles of adsorption and adsorption processes*. New York etc., John Wiley & Sons, 1984. 443 p.

For citation: Pokrovskaya E. N., Portnov F. A. Thermodynamic optimization of modifiers of the surface layer of wood. *Pozharovzryvobezopasnost / Fire and Explosion Safety*, 2017, vol. 26, no. 5, pp. 29–36 (in Russian). DOI: 10.18322/PVB.2017.26.05.29-36.



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

В. И. ГОЛОВАНОВ, д-р техн. наук, главный научный сотрудник ВНИИПО МЧС России (Россия, 143903, Московская обл., г. Балашиха, мкр. ВНИИПО, 12; e-mail: pavelgol1@yandex.ru)

Н. С. НОВИКОВ, адъюнкт, Академия ГПС МЧС России (Россия, 129366, Москва, ул. Бориса Галушкина, 4; e-mail: agps.nick182@gmail.com)

В. В. ПАВЛОВ, начальник сектора, ВНИИПО МЧС России (Россия, 143903, Московская обл., г. Балашиха, мкр. ВНИИПО, 12; e-mail: vv.pavlov@mail.ru)

Е. В. КУЗНЕЦОВА, старший научный сотрудник, ВНИИПО МЧС России (Россия, 143903, Московская обл., г. Балашиха, мкр. ВНИИПО, 12; e-mail: vniipo@mail.ru)

УДК 614.841.332.624.012.4

ПРОЧНОСТНЫЕ И ТЕПЛОФИЗИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА БЕТОНА С ПОЛИПРОПИЛЕНОВОЙ ФИБРОЙ В УСЛОВИЯХ ТЕМПЕРАТУРНОГО РЕЖИМА СТАНДАРТНОГО ПОЖАРА

Изучено влияние температуры на прочностные и теплотехнические характеристики бетона с добавкой полипропиленовых волокон. Получены аналитические зависимости прочности фибробетона на осевое сжатие в зависимости от температуры нагрева. Установлено, что при прогреве опытных образцов прочность бетона с добавкой фибры на 16 % ниже по сравнению с бетоном без добавки. Проведены эксперименты по определению теплофизических свойств бетона с добавкой полипропиленовой фибры при одностороннем нагреве опытных образцов плит по температурному режиму стандартного пожара. Получены зависимости теплофизических характеристик бетона с отечественной и импортной полипропиленовой фиброй при росте температуры, дающие возможность проводить расчет прогрева железобетонных конструкций с выбранным видом добавки. Показано, что с ростом температуры коэффициент теплопроводности бетона с добавкой полипропиленовой фибры снижается более интенсивно, чем бетона без добавки. Установлено, что добавка фибры не влияет на изменение коэффициента теплоемкости бетона при нагреве. В результате обработки экспериментальных данных получены аналитические зависимости для определения прочности бетона на сжатие и коэффициентов теплопроводности и теплоемкости в интервале температур 20–800 °С.

Ключевые слова: прочность бетона на сжатие; фибробетон; полипропиленовая фибра; температура; коэффициент теплопроводности; коэффициент теплоемкости; стандартный температурный режим пожара.

DOI: 10.18322/PVB.2017.26.05.37-44

Введение

Пожарная опасность автодорожных тоннелей глубокого заложения, железнодорожных и перегонных тоннелей метрополитена обусловлена высокой интенсивностью движения, широкой номенклатурой перевозимых пожароопасных грузов, большим количеством людей, одновременно находящихся в тоннеле. В ряде случаев пожары могут носить катастрофический характер, что приводит к массовой гибели людей, большим материальным потерям, а для их тушения требуется привлечение значительных сил и средств [1–3].

Основная цель защиты тоннелей состоит в том, чтобы сохранять несущую способность конструкций тоннеля во время и после пожара. В связи с этим при его строительстве следует использовать такие конструкции, которые позволят в случае пожара восстановить эксплуатационные возможности

тоннеля за минимальное время и с наименьшими техническими и финансовыми затратами. Растущие темпы строительства тоннелей обуславливают широкое применение в обделках тоннелей железобетонных тубингов заводского изготовления.

В отличие от железобетонных конструкций надземных зданий и сооружений ограждающие железобетонные блоки тоннельных обделок имеют повышенную влажность (более 3,5 %), что при возникновении пожара на ранних стадиях может привести к хрупкому (взрывообразному) разрушению бетона [4–6] и преждевременной потере их несущей способности.

Для уменьшения последствий от хрупкого разрушения бетона в защитном слое строительных конструкций устанавливают противооткольные сетки либо используют огнезащитные покрытия для снижения интенсивности нагрева бетона при пожаре

[7–9]. Однако современные исследования показали, что наиболее эффективным способом защиты бетона от хрупкого разрушения с точки зрения трудоемкости и материальных затрат является введение в бетонную смесь добавки в виде полипропиленовой фибры. Рекомендации по применению бетонов с полипропиленовой фиброй содержатся в EN 1992-1-2 и ряде зарубежных публикаций [10, 11]. Добавка в бетон полипропиленовой фибры в количестве $1\text{--}2\text{ кг/м}^3$ позволяет снизить вероятность взрывообразного разрушения железобетонных конструкций, имеющих повышенную влажность.

Исследование огнестойкости железобетонных конструкций тоннельных несущих и ограждающих конструкций с добавкой в бетонную смесь полипропиленовой фибры является важной задачей в области повышения пожарной безопасности тоннельных несущих и ограждающих конструкций, так как это позволяет снизить вероятность взрывообразного разрушения железобетонных конструкций, имеющих повышенную влажность. Во ВНИИПО были проведены эксперименты [12, 13] по определению фактических пределов огнестойкости двух видов тубингов и влияния на огнестойкость добавки полипропиленовой фибры в бетонную смесь.

Однако экспериментальные исследования огнестойкости тубингов довольно трудоемки и связаны с большими материальными затратами, а по результатам экспериментов невозможно оценить огнестойкость конструкций при изменении таких факторов, как размер, нагрузка, класс бетона, класс арматуры и т. д.

В настоящее время разработан метод расчета фактических пределов огнестойкости железобетонных конструкций, который состоит из теплотехнической и статической частей. В теплотехнической части при расчете температуры по сечению конструкции необходимо иметь данные по теплофизическим свойствам бетона. В статической части при расчете несущей способности конструкции используют данные по изменению прочности бетона при нагреве. Таким образом, для оценки огнестойкости железобетонных конструкций из фибробетона расчетными методами необходимо иметь данные по прочностным и теплофизическим свойствам бетона с полипропиленовой фиброй при нагреве.

С этой целью для получения исходных данных для расчета предела огнестойкости железобетонных конструкций из данного вида фибробетона были проведены исследования по определению прочностных и теплофизических характеристик бетона с добавкой полипропиленовой фибры при воздействии температурных режимов пожара.

Материалы и методика проведения экспериментов

Для проведения экспериментов по определению прочностных и теплофизических характеристик на заводе ОАО “Моспромжелезобетон” изготавливали образцы в виде кубиков и плит из бетона на основе портландцемента ПЦ I-500-Н, мелкого заполнителя — кварцевого песка, крупного заполнителя — гранитного щебня (5–15 мм) и пластификатора Glepium 51. В бетонную смесь, помимо вышеприведенных ингредиентов, добавляли полипропиленовую фибру в количестве 1 кг/м^3 .

Исследования проводили с отечественной и импортной полипропиленовой фиброй. Волокна имели диаметр 18 мкм и длину соответственно 12 и 6 мм.

Для исследования предела прочности на сжатие бетона без добавки и с добавкой полипропиленовой фибры были изготовлены образцы в виде кубиков размером $100\times 100\times 100\text{ мм}$. Исследования прочности бетона с полипропиленовой фиброй на осевое сжатие при высоких температурах нагрева проводились по разработанной методике с учетом ГОСТ 10180–2012.

Теплофизические характеристики фибробетона определяли методом решения обратной задачи нестационарной теплопроводности [3]. Коэффициенты теплопроводности λ_i и теплоемкости c_i устанавливали путем сопоставления экспериментальных и расчетных кривых прогрева плит из фибробетона. Экспериментальные данные по прогреву плит получали в результате огневых испытаний в соответствии с ГОСТ 30247.0–94.

Прочность фибробетона на осевое сжатие при нагреве

Эксперименты по определению прочности кубиков бетона на осевое сжатие при нагреве проводили в Академии ГПС МЧС России. Перед испытанием образцы прогревали в диапазоне температур $20\text{--}800\text{ }^\circ\text{C}$. Затем нагретые образцы нагружали с постоянной скоростью на гидравлическом прессе до разрушения.

При проведении экспериментов выявлен характер разрушения бетонных образцов без добавки и с добавкой полипропиленовой фибры. Установлено, что в диапазоне температур $20\text{--}200\text{ }^\circ\text{C}$ для образца бетона без добавки фибры характерно разрушение с хлопком, откалыванием составных компонентов и разлетом их на 2–3 м (рис. 1,а). Разрушение же бетонных образцов с добавкой фибры в данном интервале температур было пластичным, практически без изменения формы (рис. 1,б).

При прогреве бетонных кубиков с добавкой фибры и без добавки в диапазоне $300\text{--}800\text{ }^\circ\text{C}$ под воздействием нагрузки образцы разрушались с рассы-



Рис. 1. Вид образцов бетона без добавки (а) и с добавкой фибры (б) после проведения эксперимента

панием составных компонентов бетона. Возможно, это происходило вследствие уменьшения сцепления между компонентами бетона в результате прогрева образцов до высоких температур. Результаты исследования влияния нагрева на прочность бетонных образцов без добавки и с добавкой фибры показаны на рис. 2.

Изменение прочности бетона с увеличением температуры характеризуется коэффициентом $\gamma_{b,tem}$:

$$\gamma_{b,tem} = R_{tem} / R_{20},$$

где R_{tem} — временное сопротивление бетона сжатию при соответствующей температуре нагрева, МПа; R_{20} — временное сопротивление бетона сжатию при температуре 20 °С, МПа.

Можно предположить, что добавление полипропиленовой фибры в бетон в количестве 1 кг/м³ приводит к вытеснению из него такого же количества цемента и мелкого наполнителя и, как следствие, к снижению его прочности при нормальной температуре. При нагреве до 200–300 °С предел прочности бетона на сжатие без добавки фибры и с добавкой увеличивается благодаря уплотнению структуры цемент-

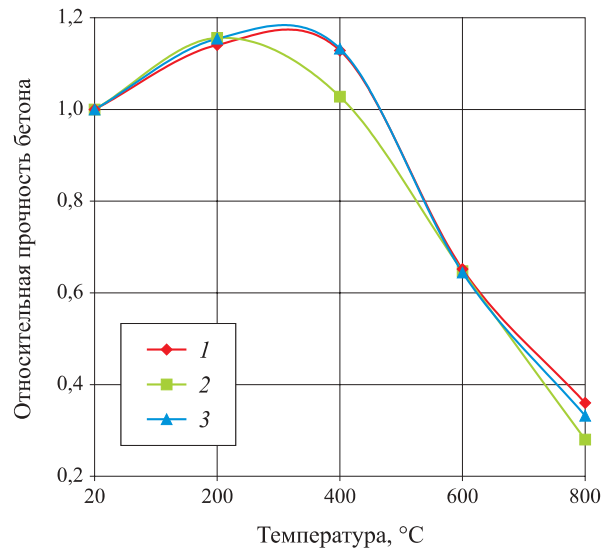


Рис. 2. Относительная прочность бетона без добавки (1) и с добавкой отечественной (2) и импортной (3) полипропиленовой фибры

ного камня, которое происходит вследствие удаления воды из геля двухкальциевого силиката, и плавлению полипропиленовой фибры при температуре 140–160 °С.

При температуре свыше 300 °С происходит резкое снижение предела прочности опытных образцов бетона на сжатие. Основной причиной этого в данном случае является различие температурных деформаций в цементном камне и в заполнителях под воздействием высоких температур.

В результате обработки экспериментальных данных методом регрессионного анализа получены аналитические зависимости для определения коэффициента $\gamma_{b,tem}$ для бетона без добавки и с добавкой фибры:

- без добавки фибры:

$$\gamma_{b,tem} = -0,0000024314t^2 + 0,0010800881t + 1,00359;$$

- с добавкой отечественной полипропиленовой фибры:

$$\gamma_{b,tem} = -0,0000023626t^2 + 0,00093184t + 1,0131;$$

- с добавкой импортной полипропиленовой фибры:

$$\gamma_{b,tem} = -0,000002561t^2 + 0,0011462t + 1,004413,$$

где t — температура бетона, °С.

Анализ полученных экспериментальных данных показал, что добавка полипропиленовой фибры снижает прочность бетона на сжатие в среднем на 16 % как при нормальной температуре, так и при повышенной.

В ходе исследований сравнивались два вида бетона, с добавкой отечественной и импортной полипропиленовой фибры. Так, в диапазоне 20–300 °С прочность на осевое сжатие бетона с добавкой оте-

чественной полипропиленовой фибры выше по сравнению с импортной на 12 %. В диапазоне 300–800 °С бетон с добавкой отечественной полипропиленовой фибры по прочности уступает бетону с добавкой импортной фибры.

Теплопроводность и теплоемкость фибробетона при нагреве

Для исследования теплофизических характеристик бетона без добавки и с добавкой полипропиленовой фибры были изготовлены опытные образцы в виде бетонных плит из того же состава бетона, что и кубики, размером 110×110 см и толщиной 11 см.

Перед бетонированием опытных образцов в опалубку устанавливали рамки-держатели (рис. 3) с закрепленными на них термоэлектрическими преобразователями — термопарами (ТП). Общий вид исследуемых образцов плит представлен на рис. 4.

Перед проведением огневых испытаний плотность бетона составляла:

- без добавки — 2405 кг/м³;
- с добавкой отечественной полипропиленовой фибры — 2365 кг/м³;
- с добавкой импортной полипропиленовой фибры — 2380 кг/м³.

Весовая влажность бетона в опытных образцах плит составила в среднем 4 %. Испытания проводились в малой горизонтальной огневой печи по стандартному температурному режиму, который описывается следующей зависимостью:

$$t_b = 345 \lg(0,133\tau + 1) + t_n,$$

где t_b — температура в огневой камере печи, соответствующая времени τ , °С;

t_n — начальная температура окружающей среды, °С;

τ — время нагрева образца, с.

Во время огневых испытаний температура в плитах замерялась с помощью трех термопар, установленных на расстоянии 25, 55 и 85 мм от обогреваемой поверхности, и трех термопар — на необогреваемой поверхности. Результаты прогрева плит представлены на рис. 5. Из рисунка видно, что при достижении температуры 100 °С кривые прогрева имеют явно выраженный пологий участок (площадку выпаривания), а скорость прогрева бетона с добавкой полипропиленовой фибры снижается по сравнению с бетоном без добавки. Возможно, при прогреве опытных образцов с добавкой фибры происходит плавление полипропилена и его выпаривание из состава бетона совместно с водой. В результате пористость материала увеличивается. В порах бетона после этого процесса остается воздушное пространство, что приводит к снижению теплопередачи в его структуре.

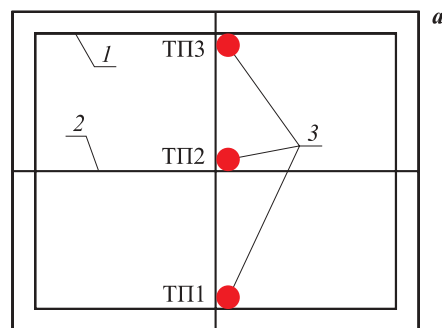


Рис. 3. Схема (а) и общий вид (б) рамки-держателя для термопар: 1 — металлическая рамка; 2 — металлическая проволока; 3 — термопары



Рис. 4. Плиты для исследования теплофизических характеристик

Если проанализировать графики прогрева бетонов с добавкой импортной и отечественной полипропиленовой фибры, то можно увидеть, что бетон с добавкой импортной фибры прогревается более интенсивно, чем с отечественной. В данном случае

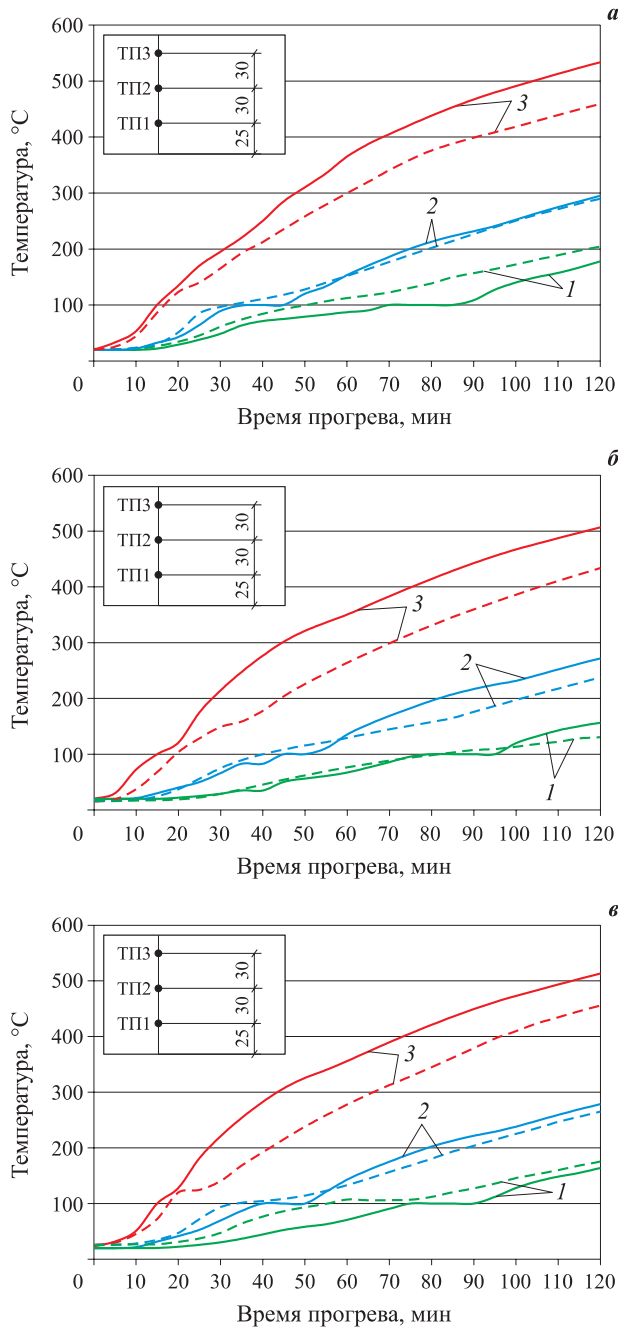


Рис. 5. Расчетные (—) и экспериментальные (---) кривые прогрева бетонных плит без добавки (а) и с добавкой отечественной (б) и импортной (в) фибры: 1–3 — температура в местах установки термодпар соответственно ТП1–ТП3

основное влияние на разницу в прогреве оказывают размеры волокон фибры. Длина волокон отечественной фибры больше, чем импортной, что увеличивает размер пор и их количество в бетоне.

Для определения коэффициентов теплопроводности λ_t и теплоемкости c_t использовали прямолнейные зависимости от температуры t :

$$\lambda_t = A + Bt; \quad c_t = C + Dt.$$

Начальные коэффициенты теплопроводности A и теплоемкости C , соответствующие данной плот-

ности бетона, взяты из соответствующей справочной литературы. При наличии экспериментальных данных путем решения обратной задачи теплопроводности с помощью ранее разработанной компьютерной программы были определены теплофизические характеристики (коэффициенты теплопроводности и теплоемкости) фибробетона при повышенных температурах.

В результате исследований получены следующие зависимости:

- для бетона без добавки фибры:

$$\lambda_t = 1,3 - 0,0005t; \quad c_t = 481 + 0,9t;$$

- для бетона с добавкой отечественной и импортной полипропиленовой фибры:

$$\lambda_t = 1,3 - 0,0006t; \quad c_t = 481 + 0,92t.$$

Полученные зависимости наглядно показывают, что при введении в состав бетона полипропиленовой фибры при нагреве наблюдается более интенсивное снижение коэффициента теплопроводности λ_t фибробетона по сравнению с бетоном без добавки. В то же время при нагреве увеличение коэффициента теплоемкости c_t фибробетона происходит более высоким темпом по сравнению с бетоном без добавки.

Заключение

Установлено влияние нагрева в интервале температур 20–800 °С на прочностные и теплофизические характеристики бетона с добавкой отечественной и импортной полипропиленовой фибры в количестве 1 кг/м³.

В результате обработки экспериментальных данных методом регрессионного анализа получены аналитические зависимости для определения прочностных характеристик исследуемого фибробетона на осевое сжатие при воздействии высоких температур.

Эксперименты по определению теплофизических свойств (коэффициенты теплопроводности и теплоемкости) фибробетона проводили при одностороннем нагреве опытных образцов плит по температурному режиму стандартного пожара. Полученные зависимости теплофизических характеристик бетона с отечественной и импортной полипропиленовой фиброй при росте температуры дают возможность проводить расчеты прогрева железобетонных конструкций с выбранным видом добавки при температурном режиме стандартного пожара.

Проведенные исследования влияния температуры на прочностные и теплофизические свойства бетона с добавкой полипропиленовой фибры могут быть использованы при расчете предела огнестойкости несущих и ограждающих конструкций, изготовленных из данного вида фибробетона.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Dehn F., Werther N., Knitl J.* Großbrandversuche für den City-Tunnel Leipzig // Beton- und Stahlbetonbau. — 2006. — Vol. 101, Issue 8. — P. 631–636 (in German). DOI: 10.1002/best.200608186.
2. *Kordina K.* Brände in unterirdischen Verkehrsanlagen // Bautechnik. — 2003. — Vol. 80, No. 5. — P. 327–338 (in German). DOI: 10.1002/bate.200302620.
3. *Яковлев А. И.* Расчет огнестойкости строительных конструкций. — М. : Стройиздат, 1988. — 144 с.
4. *Moore D. B., Lennon T.* Fire engineering design of steel structures // Progress in Structural Engineering and Materials. — 1997. — Vol. 1, No. 1. — P. 4–9. DOI: 10.1002/pse.2260010104.
5. *Maraveas C., Vrakas A. A.* Design of concrete tunnel linings for fire safety // Structural Engineering International. — 2014. — Vol. 24, No. 3. — P. 319–329. DOI: 10.2749/101686614X13830790993041.
6. *Бартелеми Б., Крюнна Ж.* Огнестойкость строительных конструкций / Пер. с фр. — М. : Стройиздат, 1985. — 216 с.
7. *Фёдоров В. С., Левитский В. Е., Молчадский И. С., Александров А. В.* Огнестойкость и пожарная опасность строительных конструкций. — М. : Изд-во АСВ, 2009. — 408 с.
8. *Леннон Т., Мур Д. Б., Ван Ю. К., Бейли К. Г.* Руководство для проектировщиков к EN 1991-1-2, 1992-1-2, 1993-1-2 и 1994-1-2. Справочник по проектированию противопожарной защиты стальных, сталежелезобетонных и бетонных конструкций зданий и сооружений в соответствии с еврокодами. — М. : МГСУ, 2013. — 196 с.
9. *Голованов В. И., Кузнецова Е. В.* Эффективные средства огнезащиты для стальных и железобетонных конструкций // Промышленное и гражданское строительство. — 2015. — № 9. — С. 82–90.
10. *Young-Sun Heo, Jay G. Sanjayan, Cheon-Goo Han, Min-Cheol Han.* Synergistic effect of combined fibers for spalling protection of concrete in fire // Cement and Concrete Research. — 2010. — Vol. 40, No. 10. — P. 1547–1554. DOI: 10.1016/j.cemconres.2010.06.011.
11. *Werther N.* Brandversuche an Tunnelinnenschalenbetonen für den M 30-Nordtunnel in Madrid // Beton- und Stahlbetonbau. — 2006. — Vol. 101, Issue 9. — P. 729–731 (in German). DOI: 10.1002/best.200608187.
12. *Голованов В. И., Павлов В. В., Пехотилов А. В.* Защита железобетонных туннелей от хрупкого разрушения при пожаре // Пожарная безопасность. — 2008. — № 2. — С. 50–55.
13. *Голованов В. И., Павлов В. В.* Экспериментальные исследования огнестойкости блоков обделки тоннельных коллекторов // Пожарная безопасность. — 2011. — № 4. — С. 81–89.

Материал поступил в редакцию 15 марта 2017 г.

Для цитирования: Голованов В. И., Новиков Н. С., Павлов В. В., Кузнецова Е. В. Прочностные и теплофизические свойства бетона с полипропиленовой фиброй в условиях температурного режима стандартного пожара // Пожаровзрывобезопасность. — 2017. — Т. 26, № 5. — С. 37–44. DOI: 10.18322/PVB.2017.26.05.37-44.

English

STRENGTH AND THERMO-PHYSICAL PROPERTIES OF CONCRETE WITH POLYPROPYLENE FIBER UNDER STANDARD TEMPERATURE REGIMES

GOLOVANOV V. I., Doctor of Technical Sciences, Chief Researcher, All-Russian Research Institute for Fire Protection of Emercom of Russia (VNIIPPO, 12, Balashikha, Moscow Region, 143903, Russian Federation; e-mail: pavelgol1@yandex.ru)

NOVIKOV N. S., Postgraduate Student, State Fire Academy of Emercom of Russia (Borisa Galushkina St., 4, Moscow, 129366, Russian Federation; e-mail: agps.nick182@gmail.com)

PAVLOV V. V., Head of Sector, All-Russian Research Institute for Fire Protection of Emercom of Russia (VNIPO, 12, Balashikha, Moscow Region, 143903, Russian Federation; e-mail: vv.pavlov@mail.ru)

KUZNETSOVA E. V., Senior Researcher, All-Russian Research Institute for Fire Protection of Emercom of Russia (VNIPO, 12, Balashikha, Moscow Region, 143903, Russian Federation; e-mail: vniipo@mail.ru)

ABSTRACT

The paper discusses the problems of protection of reinforced concrete tunnel structures from brittle (explosive) destruction of concrete tubing lining of the tunnel. The relevance of the research is attributed to increasing pace of construction of deep-level tunnels. Fires in such facilities could be catastrophic, often resulting in massive loss of life and great material losses, and their suppression requires involvement of considerable forces and assets.

During the construction and operation of road and subway tunnels, the protecting structures — reinforced concrete lining blocks have a higher moisture content, which in the event of fire in the early stages can lead to brittle failure of concrete tubing and the premature loss of their load-bearing capacity.

To reduce the effects of brittle fracture of concrete in the protective layer of concrete structures anti-spall mesh is installed, or fire retardant coating is used which reduces the intensity of heating of concrete during fire. However, recent studies have shown that the most effective way of protecting against brittle fracture of concrete from the point of view of labor and material cost is the use of additives in the concrete mixture in the form of polypropylene fibers. Earlier, experiments were carried out in VNIPO to determine the actual limits of fire resistance of tunnel tubing and the influence of polypropylene fibers additives in concrete mix on the likelihood of brittle fracture of concrete. However it seems impossible to assess the fire resistance of similar structures using numerical methods due to the lack of baseline data on the strength and thermo-physical properties of concrete with polypropylene fibers.

To achieve this goal, studies were conducted of concrete strength under axial compression with the addition of polypropylene fibers in the amount of 1 kg/m^3 and experimental data of thermal characteristics of fiber-reinforced concrete at high temperatures were obtained. The paper presents the results of experiments on the samples of fiber concrete under axial compression when exposed to temperature in the range $20\text{--}800^\circ\text{C}$. Graphics show the process of the strength change of concrete with and without additives during heating.

Analytical dependencies for determination of strength of concrete under compression were obtained with two types of polypropylene fibers at high temperatures. A comparison of the strength properties of the investigated concrete mixtures was carried out. It was established experimentally that when using the polypropylene fibers, the strength characteristics of fiber-concrete are reduced on average by 16 %, compared to the concrete without fiber additives, both at normal and high temperatures. As a result of processing of the experimental data by regression analysis the analytical dependencies were obtained for determination of strength characteristics of concrete under axial compression with the addition of domestic and imported fibers when exposed to high temperatures.

Experiments to determine the thermal properties of concrete with the addition of polypropylene fibers, were conducted during one-sided heating of board samples on the temperature regime of “standard fire”.

In the presence of experimental data, by solving the inverse heat conduction problem using the previously developed computer program, the thermophysical characteristics (thermal conductivity and heat capacity) of fiber-reinforced concrete at elevated temperatures were defined. With increasing temperature, the thermal conductivity decrease is more intensive in concrete with added polypropylene fibers than that of concrete without additives. At the same time, the addition of fiber does not affect the intensity of increase of the heat capacity of concrete. The obtained dependences of thermophysical properties of concrete with domestic and imported polypropylene fibers on temperature increase make it possible to carry out calculations of heating of concrete structures with selected additives on a temperature regime of “standard fire”.

The conducted studies on the effect of temperature on the strength and thermal properties of concrete with addition of polypropylene fiber reinforcement can be used in calculation of the fire resistance of load-bearing and enclosing structures made of this type of fiber-reinforced concrete.

Keywords: axial compression strength; concrete; fiber concrete; polypropylene fiber; temperature; coefficient of thermal conductivity; coefficient of heat capacity; temperature regime of “standard fire”.

REFERENCES

1. Dehn F., Werther N., Kniel J. Großbrandversuche für den City-Tunnel Leipzig. *Beton- und Stahlbetonbau*, 2006, vol. 101, issue 8, pp. 631–636 (in German). DOI: 10.1002/best.200608186.
2. Kordina K. Brände in unterirdischen Verkehrsanlagen. *Bautechnik*, 2003, vol. 80, no. 5, pp. 327–338 (in German). DOI: 10.1002/bate.200302620.
3. Yakovlev A. I. *Raschet ognestoykosti stroitelnykh konstruktsey* [Calculation of fire resistance of building structures]. Moscow, Stroyizdat Publ., 1988. 143 p. (in Russian).
4. Moore D. B., Lennon T. Fire engineering design of steel structures. *Progress in Structural Engineering and Materials*, 1997, vol. 1, no. 1, pp. 4–9. DOI: 10.1002/pse.2260010104.
5. Maraveas C., Vrakas A. A. Design of concrete tunnel linings for fire safety. *Structural Engineering International*, 2014, vol. 24, no. 3, pp. 319–329. DOI: 10.2749/101686614X13830790993041.
6. Barthélémy B., Kruppa J. *Résistance au feu des structures béton — acier — bois*. Paris, Editions Eyrolles, 1978. 216 p. (in French) (Russ. ed.: Barthélémy B., Kruppa J. Ognestoykost stroitelnykh konstruktsey. Moscow, Stroyizdat Publ., 1985. 216 p.).
7. Fedorov V. S., Levitskiy V. E., Molchadskiy I. S., Aleksandrov A. V. *Ognestoykost i pozharnaya opasnost stroitelnykh konstruktsey* [Fire behavior and fire danger of building designs]. Moscow, ASV Publ., 2009. 408 p. (in Russian).
8. Lennon T., Moore D. B., Wang Yu. K., Bailey K. G. *Designers' Guide to EN 1991-1-2, 1992-1-2, 1993-1-2 and 1994-1-2. Handbook for the fire design of steel, composite and concrete structures to the Eurocodes*. Moscow, MGSU Publ., 2013. 196 p. (in Russian).
9. Golovanov V. I., Kuznetsova E. V. Effective means of fire protection for steel and concrete structures. *Promyshlennoye i grazhdanskoye stroitelstvo / Industrial and Civil Engineering*, 2015, no. 9, pp. 82–90 (in Russian).
10. Young-Sun Heo, Jay G. Sanjayan, Cheon-Goo Han, Min-Cheol Han. Synergistic effect of combined fibers for spalling protection of concrete in fire. *Cement and Concrete Research*, 2010, vol. 40, no. 10, pp. 1547–1554. DOI: 10.1016/j.cemconres.2010.06.011.
11. Werther N. Brandversuche an Tunnelinnenschalenbetonen für den M 30-Nordtunnel in Madrid. *Beton- und Stahlbetonbau*, 2006, vol. 101, issue 9, pp. 729–731 (in German). DOI: 10.1002/best.200608187.
12. Golovanov V. I., Pavlov V. V., Pekhotikov A. V. Protection of concrete tubing highway tunnels by brittle fracture during a fire. *Pozharnaya bezopasnost / Fire Safety*, 2008, no. 2, pp. 50–55 (in Russian).
13. Golovanov V. I., Pavlov V. V. Experimental research in fire resistance of liner blocks for tunnel collectors. *Pozharnaya bezopasnost / Fire Safety*, 2011, no. 4, pp. 81–89 (in Russian).

For citation: Golovanov V. I., Novikov N. S., Pavlov V. V., Kuznetsova E. V. Strength and thermo-physical properties of concrete with polypropylene fiber under standard temperature regimes. *Pozharo-vzryvobezopasnost / Fire and Explosion Safety*, 2017, vol. 26, no. 5, pp. 37–44 (in Russian). DOI: 10.18322/PVB.2017.26.05.37-44.

В. И. ПРИСАДКОВ, д-р техн. наук, профессор, главный научный сотрудник, ВНИИПО МЧС России (Россия, 143903, Московская обл., г. Балашиха, мкр. ВНИИПО, 12)

Т. Ю. ЕРЕМИНА, д-р техн. наук, профессор, старший научный сотрудник научно-образовательного комплекса организационно-управленческих проблем ГПС, Академия ГПС МЧС России (Россия, 129366, г. Москва, ул. Бориса Галушкина, 4; e-mail: main@stopfire.ru)

Н. В. ТИХОНОВА, ведущий инженер, ООО "Международный научный инновационный центр строительства и пожарной безопасности" (Россия, 199155, г. Санкт-Петербург, ул. Уральская, 13; e-mail: risk@stopfire.ru)

УДК 64.841

ПРЕДПОСЫЛКИ РАЗРАБОТКИ СВОДА ПРАВИЛ "ПРОТИВОПОЖАРНАЯ ЗАЩИТА ОБЪЕКТОВ КУЛЬТУРНОГО НАСЛЕДИЯ"

Рассмотрены вопросы обеспечения пожарной безопасности, возникающие при приспособлении объектов культурного наследия для современного использования. Проведен анализ российских и международных нормативных документов, регламентирующих требования пожарной безопасности для таких объектов. Описаны основные проблемы применения требований нормативных документов к элементам объектов, являющимся предметом охраны, при реконструкции, капитальном ремонте, приспособлении их для современного использования. Разработаны предложения по совершенствованию нормативных документов. Сформулированы предложения по применению средств противопожарной защиты с учетом специфики объектов. Описаны проблемы расчета пожарного риска с использованием утвержденной методики. Проанализированы преимущества и недостатки различных подходов к определению расчетных величин пожарного риска для объектов культурного наследия.

Ключевые слова: объекты культурного наследия; приспособление объектов культурного наследия для современного использования; противопожарная защита; методика оценки пожарного риска; многосветные помещения; автоматическая установка пожаротушения; противопожарные двери.

DOI: 10.18322/PVB.2017.26.05.45-53

Введение

При проектировании систем противопожарной защиты объектов культурного наследия в России руководствуются требованиями действующих нормативных документов, в том числе [1–4]. В дополнение к ним используются территориальные строительные нормы, например [5, 6]. Подробный обзор нормативных документов, относящихся к объектам культурного наследия, приведен в работе [7].

Среди аналогичных международных нормативных документов следует отметить разработки CFPA (Confederation of Fire Protection Association), NFPA (National Fire Protection Association), BSI (British Standard Institute), CTIF (International Association of Fire and Rescue Service).

В руководстве CFPA E-30–2013 [8] особое внимание уделено индивидуальному подходу к размещению традиционных систем пожаротушения в исторических зданиях. В документах NFPA 914 [9] и NFPA 909 [10] приведен перечень необходимых мероприятий для обеспечения пожарной безопасно-

сти на объектах исторического и культурного наследия.

При разработке и обосновании вариантов противопожарной защиты объектов культурного наследия у проектировщиков и надзорных органов возникает много типовых вопросов, часть из которых будет рассмотрена ниже.

Объекты культурного наследия строились и эксплуатировались задолго до выхода Федерального закона "Технический регламент о требованиях пожарной безопасности" (далее — ФЗ № 123) [2].

При проведении реконструкции, капитального ремонта, приспособлении ряда объектов культурного наследия (далее — объектов) могут иметь место ситуации, когда применяемые на них объемно-планировочные и конструктивные решения, являющиеся предметом охраны, противоречат требованиям ФЗ № 123 [2].

Согласно п. 4 ст. 4 [2] требования пожарной безопасности применяются к объектам защиты в части, касающейся объема работ по капитальному ремонту, реконструкции или техническому перево-

оружению объекта. А согласно п. 3 ст. 80 ФЗ № 123 “при изменении функционального назначения зданий, сооружений или отдельных помещений в них, а также при изменении объемно-планировочных и конструктивных решений должно быть обеспечено выполнение требований пожарной безопасности, установленных в соответствии с настоящим Федеральным законом применительно к новому назначению этих зданий, сооружений или помещений”.

На вопрос о том, в какой части (с учетом ст. 4 [2]) работы по капитальному ремонту, реконструкции или техническому перевооружению объекта влияют на систему пожарной безопасности объекта, направленную на предотвращение пожара, обеспечение безопасности людей и защиту имущества при пожаре, могут дать ответ специалисты в каждом конкретном случае.

Объекты культурного наследия, приспособленные для современного использования, могут относиться к следующим классам функциональной пожарной опасности:

- гостиницы, санатории — Ф1.2;
- музеи, выставки, культовые объекты — Ф2.2;
- театры, библиотеки — Ф2.3;
- здания образовательных учреждений — Ф4.1;
- здания органов управления, банков, офисов и т. д. — Ф4.3,

а также являться многофункциональными зданиями, например культовыми, включающими моленные залы, библиотеки, помещения для дополнительного образования людей и т. д. [11].

Вместе с тем, как показывает практика, на объектах культурного наследия с массовым пребыванием людей, в первую очередь, должна обеспечиваться безопасность людей при пожаре, поэтому ниже подробно рассматриваются именно эти вопросы.

Цели и задачи

Критерием качества системы пожарной безопасности на объекте является величина индивидуального пожарного риска, которая не должна превышать для объектов классов функциональной пожарной опасности Ф1–Ф4 10^{-6} в год.

В то же время на объектах культурного наследия могут встречаться архитектурно-строительные решения, которые не могут быть учтены при определении расчетных величин индивидуального пожарного риска в соответствии с методикой [12] (далее — Методика). Таким образом, при реконструкции, реставрации и приспособлении конкретных объектов с учетом предмета охраны необходимо проверить выполнение критерия безопасности людей путем сравнения расчетного значения риска на объекте с нормативным.

При этом могут возникать следующие проблемы.

1. На объекте* предусмотрены объемно-планировочные и конструктивные решения (позиции), являющиеся предметом охраны, которые противоречат требованиям ФЗ № 123 [2]:

- непосредственная связь через открытую лестницу подвального этажа с надземным этажом;
- наличие двух подземных этажей в здании;
- наличие открытой парадной лестницы, связывающей три и более надземных этажа;
- устройство эвакуационных выходов из подвального этажа во входной вестибюль здания;
- наличие лестниц с использованием ценных пород древесины;
- наличие путей эвакуации через помещение, в котором расположены лестницы 2-го типа, не являющиеся эвакуационными;
- наличие исторической отделки зальных помещений, выполненных из горючих материалов (древесины, тканей, гобеленов), что не соответствует допустимому классу конструктивной пожарной опасности материалов, установленному в ФЗ № 123, и т. д.

2. На объекте имеются объемно-планировочные и конструктивные решения, являющиеся предметом охраны, которые противоречат требованиям нормативных документов по пожарной безопасности добровольного применения:

- уклон лестниц на путях эвакуации превышает допустимые значения, ширина проступи маршей лестниц составляет менее 22 см, а высота ступени — более 22 см;
- на путях эвакуации устроены криволинейные и винтовые лестницы;
- на путях эвакуации предусмотрены лестничные клетки без естественного освещения, которые, являясь предметом охраны, не могут быть доработаны в незадымляемые лестничные клетки;
- на путях эвакуации устроены 1–2 ступеньки, которые не могут быть по определенным причинам заменены на пандусы;
- исторические лестницы имеют разбросы по высоте ступенек;
- использование древесины в исторических лестницах, конструкциях мансард (пусть даже в отдельных узлах зданий) может быть причиной понижения класса конструктивной пожарной опасности зданий, что обуславливает уменьшение допустимых расстояний в залах, коридорах на путях эвакуации и может быть критичным для конкретного объекта;
- наличие локальных уменьшений высоты проходов, например дверных проемов, на путях эвакуации и т. д.

* Ниже по известным соображениям не приводятся адреса конкретных объектов культурного наследия.

Материалы и методы исследования

Описанные проблемы создают существенные затруднения при разработке системы противопожарной защиты объекта. Для объектов с указанной спецификой путей эвакуации из-за наличия отступлений от требований нормативных документов невозможно выполнить расчет пожарного риска для решения вопроса о пожарной безопасности объекта с учетом предлагаемых компенсирующих мероприятий.

В части разрешения вопросов, относящихся к первой проблеме, можно надеяться на то, что по мере развития научно-прикладных исследований можно будет со временем сформулировать условия (возможность реализации их должна подтвердить практика), при которых допустимо наличие таких элементов на объектах культурного наследия.

Вопросы, относящиеся ко второй проблеме, не учтены в Методике [12]. Для объектов с указанной спецификой путей эвакуации невозможно провести расчет величины пожарного риска, поэтому нельзя получить положительный ответ о достаточности предлагаемых дополнительных мероприятий, учитывающих наличие на объекте соответствующих конструктивных решений.

Внесение в Методику [12] изменений, касающихся второй проблемы, возможно на основе подхода, изложенного в работе [13]. При этом необходимо провести соответствующие эксперименты с потоками людей на путях эвакуации с элементами, указанными во второй группе, для определения параметров движения. При этом возникают определенные сложности в планировании и использовании результатов экспериментов, а именно:

- 1) разработка планов натурных экспериментов:
 - выбор и обоснование параметров путей эвакуации;
 - состав эвакуирующихся, включая маломобильные группы населения;
- 2) возможности экстраполяции результатов: насколько допустимо распространение результатов на те объемно-планировочные решения, которые не были экспериментально подтверждены;
- 3) точность и устойчивость результатов при разбросе исходных данных.

Такая доработка Методики [12] является достаточно трудоемкой, и ее результаты, по-видимому, не смогут считаться абсолютно надежными.

Это дополнительно подтверждает необходимость разработки сводов правил по противопожарной защите объектов культурного наследия, обобщающих требования нормативных документов по пожарной безопасности и опыт разработки специальных технических условий (СТУ) на подобные объекты, компенсирующих недостаточность или противоречи-

вость требований [1, 2] по пожарной безопасности к объектам культурного наследия.

В соответствии с п. 4.3 Методики [12] “результаты и выводы, полученные при определении пожарного риска, используются для обоснования параметров и характеристик зданий и сооружений, которые учитываются в Методике”. Перспективным направлением дальнейших исследований представляется доработка Методики в плане возможности учета при расчете риска современных технологий предотвращения и тушения пожаров, в том числе включение в Методику элементов вероятностного подхода. Это повлечет за собой утверждение дополнительных требований к совершенствованию информационно-обеспечения методики.

В работе [14] приведены результаты сравнительного анализа зарубежных нормативных документов, регламентирующих определение расчетных величин пожарного риска [15, 16]. Предлагаемый международными стандартами вероятностный подход представляется более гибким, так как основан на более рациональном сопоставлении опасных факторов пожара, уровня безопасности людей, ожидаемого материального ущерба и, в конечном счете, затрат на противопожарную защиту. Он дает возможность, например, рассматривать ликвидацию пожара на ранних стадиях, что существенно снижает ущерб, наносимый пожарами.

Основным недостатком широко используемого детерминированного подхода считаются определенные консервативные предположения и прежде всего — выбор наиболее неблагоприятного варианта пожара (“принцип максимального проектного пожара”). Детерминированный подход дает определенный запас надежности, что, однако, может стать причиной неоправданно завышенных материальных затрат на обеспечение пожарной безопасности объекта защиты. В отношении объектов культурного наследия это означает еще и определенные затруднения при проведении расчета, обусловленные противоречиями между требованиями нормативных документов по пожарной безопасности и охранных документов.

В свою очередь, при вероятностном подходе возможны ситуации, когда оценка последствий и/или вероятности какого-либо события затруднительна из-за отсутствия достаточного количества необходимой информации или статистических данных. Тем не менее использование вероятностного метода определения расчетных величин пожарного риска могло бы стать особенно эффективным для объектов культурного наследия, поскольку позволило бы применять не типовые параметры объектов, а уникальные решения, разработанные для них с учетом

предметов охраны и прочих индивидуальных особенностей.

Выявленные выше проблемы указывают на необходимость разработки соответствующего свода правил, который максимально эффективно устранял бы противоречия и узаконивал действия проектных организаций в подобных случаях.

До актуализации Методики [12] с учетом вероятностного подхода предлагается на подобные объекты разрабатывать СТУ по проектированию систем противопожарной защиты, в которые должен закладываться принцип “разумного приспособления”, с согласованием их в установленном порядке.

Наличие в зданиях элементов, не включаемых в расчет в соответствии с Методикой [12], предложено учитывать при расчете рисков, вводя установленные экспертным путем поправочные коэффициенты, позволяющие использовать в расчетах верхние оценки времени эвакуации.

Результаты и их обсуждение

В связи с вышеизложенным предлагается следующее:

1. В случае наличия отступлений от требований обязательного применения, установленных национальными стандартами и сводами правил, в состав СТУ должны быть включены положения, компенсирующие эти отступления, при обосновании их одним или несколькими способами в соответствии с п. 6 ст. 15 Технического регламента № 384-ФЗ [17].

2. В случае невозможности выполнения требований нормативных документов добровольного применения по пожарной безопасности при реконструкции, капитальном ремонте и приспособлении объектов следует осуществлять проектирование в рамках “разумного приспособления” при согласовании СТУ в установленном порядке.

3. Подтверждение соответствия защиты объекта культурного наследия требованиям пожарной безопасности допускается путем расчета величины пожарного риска и сопоставления ее с нормативным значением при следующих условиях:

- при наличии на объекте элементов, имеющих отношение ко второй проблеме, экспертным путем должны выбираться наихудшие допустимые параметры, вводиться поправочные коэффициенты, характеризующие процесс эвакуации и позволяющие использовать в расчетах верхние оценки времени эвакуации с учетом соответствующих элементов объемно-планировочных и конструктивных решений;
- эвакуирующиеся должны быть обеспечены информацией об особенностях путей эвакуации (как компенсация отступлений по конкретным элементам).

В перспективе целесообразно использовать для расчета пожарных рисков имитационные системы, в которые легко ввести характеристики элементов по второй проблеме [18].

Необходимо также остановиться на вопросах, которые актуальны и в то же время недостаточно проработаны в нормативных документах применительно к объектам культурного наследия.

Здания с многосветными пространствами (атриумами)

Во второй половине XIX – начале XX века для входной группы помещений в различных по назначению зданиях наиболее распространенным было следующее решение (1-й вариант): входной вестибюль с примыкающими помещениями (1-й уровень) — парадная открытая лестница — зал(ы) с окружающими помещениями (2-й уровень) — открытые лестницы — помещения с выходами на балкон (3-й уровень). На каждом уровне, как правило, предусматривались окна.

Весьма часто под парадной лестницей или рядом с ней располагались открытые лестницы, ведущие в подвальный (цокольный) этаж ((–1)-й уровень).

Рассмотрим второй упрощенный (модельный) вариант: многосветное помещение в форме параллелепипеда, аналогичное описанному выше по размерам (по ширине, длине, высоте) с расположенными на уровнях этажей галереями и практически равными объемами.

Положим, на (–1)-м уровне в двух вариантах расположены одинаковые по характеристикам очаги пожаров. Определим расчетным путем зависимость высоты незадымляемой зоны от времени.

Учитывая аэрофизику конвективных колонок, на основании результатов, приведенных Х. П. Морганом и Г. О. Ханселом [19], можно сделать вывод, что при наличии лестниц, вертикальных и горизонтальных конструкций в объеме атриума скорость опускания границы дыма в реальном (первом) варианте с открытыми лестницами будет существенно выше, чем в аналогичном атриуме, но с галереями (при неуточненных одинаковых внешних условиях). Иначе говоря, реальная пожарная опасность во фрагменте здания с открытыми лестницами будет выше в плане задымления (ведущего опасного фактора пожара), чем в аналогичном атриуме с галереями. Здесь также важно следующее: если мы примем подвальный этаж за часть атриума, то это позволит в СТУ обосновать и сохранить наличие открытых лестниц между первым и подвальным этажами для объектов культурного наследия. Конечно, это возможно лишь при выполнении ряда противопожарных мероприятий, которые не могут рассматриваться как чрезмерные.

Использование автоматических установок пожаротушения

Рассмотрим здания с многосветными пространствами. Некоторые специалисты считают, что если в здании есть атриумы, то нужно обязательно защищать их и связанные с ними помещения автоматической установкой пожаротушения (АУП).

В помещениях объектов культурного наследия, в частности в помещениях, в которых широко используются лепка, фрески, плафоны и т. д. и которые являются предметом охраны, недопустимо использование АУП. Практическая наука располагает достаточным набором других средств противопожарной защиты.

Автоматические установки пожаротушения целесообразно использовать для защиты помещений в подвальных этажах, во вспомогательных, хозяйственных пожароопасных помещениях. Например, при размещении помещений воскресных школ в подвальном этаже храма необходимо соответствующие помещения защищать АУП.

Использование противодымной вентиляции

Существуют две группы помещений. В первой из них вопрос об использовании системы противодымной вентиляции решается на основе расчетов, а относительно второй группы помещений можно заранее сказать, что в них противодымная вентиляция должна быть обязательно.

В первом случае речь идет о высоких помещениях с большими внутренними объемами, например о трапезной, молельном зале и т. п. в культовых зданиях.

Ко второй группе относятся невысокие помещения, например помещения нижнего храма в подклети. В данном случае необходимо установить площадь открываемых проемов и способ подачи компенсационных расходов воздуха с учетом характеристик эвакуационных выходов и расчетного количества людей в храме.

Основной целью выбора рационального варианта системы противодымной вентиляции является обеспечение безопасной эвакуации людей и работы пожарных подразделений при пожаре.

Если объект сдавался до дня вступления в силу ФЗ № 123 [2], то безопасная эвакуация людей считается обеспеченной, если интервал времени с момента обнаружения пожара до завершения процесса эвакуации людей наружу не превышает необходимого времени их эвакуации при пожаре (п. 3 ст. 53 [2]).

Такой подход допустим для широкого спектра объектов культурного наследия.

Противопожарные двери

При проектировании объектов культурного наследия часто возникают два вопроса, касающиеся дверей, являющихся предметом охраны:

- при каких условиях можно использовать их как противопожарные;
- возможно ли открывание их не по направлению выхода из здания (эвакуации).

Учитывая, что двери часто являются предметом охраны, констатируем, что сказанное выше может допускаться при определенных (и согласованных в установленном порядке) условиях.

Если двери выполнены из монолита древесины (лучше дуба) толщиной 6–7 см, то после определенной доработки по месту установки могут быть обеспечены требуемые пределы их огнестойкости (принцип “разумного приспособления”).

Если двери открываются против направления эвакуации, то они должны быть оснащены фиксаторами (крючки, шпингалеты), с помощью которых сотрудники охраны могли бы закрепить их в открытом состоянии при обнаружении пожара.

Соответствующие обязанности сотрудников охраны должны быть внесены в специальные правила противопожарного режима по объекту.

Заключение

1. Все вопросы, рассмотренные в статье, встречались в практике проектирования и имели конкретные решения, согласованные в установленном порядке [20–24]. В дальнейшем необходимо рассмотреть и другие вопросы, встречающиеся на практике, при проектировании систем противопожарной защиты объектов культурного наследия, например: устройство безопасных зон, компенсирующие мероприятия для заужений эвакуационных выходов; спасение при пожаре маломобильных групп населения; увеличение количества ступеней в одном лестничном марше; наличие решеток на окнах; составление деклараций пожарной безопасности и т. д.

2. Установлено, что на объектах культурного наследия могут иметь место отступления от требований ФЗ № 123 [2], которые не могут быть устранены при реконструкции и приспособлении объектов, так как они являются предметом охраны.

3. Установлено, что на объектах могут предусматриваться объемно-планировочные и конструктивные решения, которые не учтены в Методике [12], что не позволяет провести расчет индивидуального пожарного риска и подтвердить требуемый уровень пожарного риска на объекте.

4. Необходимо разработать свод правил, в котором бы устранялись все возможные противоречия между требованиями Технического регламента [2] и существующими реалиями при использовании объ-

емно-планировочных и конструктивных решений на объектах культурного наследия.

5. В случае невозможности выполнения требований нормативных документов добровольного применения по пожарной безопасности при реконструкции, капитальном ремонте и приспособлении объектов для современного использования следует осуществлять проектирование в рамках “разумного приспособления” при согласовании СТУ в установленном порядке.

6. Разработаны предложения по условиям использования актуализированной редакции Методики [12] для расчета величины индивидуального пожарного риска для объектов культурного наследия при имеющихся место особенностях данных объектов.

7. Для особо сложных объектов культурного наследия с отступлениями от требований нормативных документов по объемно-планировочным и конструктивным решениям целесообразно использовать стохастическое имитационное моделирование на основе метода Монте-Карло.

Необходимо рассмотреть возможность включения в Методику [12] элементов вероятностного под-

хода к определению расчетных величин индивидуального пожарного риска, используемого в ряде международных нормативных документов.

8. На основе рассмотрения некоторых типовых объемно-планировочных и конструктивных решений для объектов культурного наследия предложены рациональные варианты их противопожарной защиты, обеспечивающие сохранение архитектурных и конструктивных решений зданий, причем при минимальных затратах.

9. Для проведения анализа типовых вариантов объемно-планировочных и конструктивных решений для объектов культурного наследия необходимо ввести классификацию их элементов, являющихся предметом охраны, и на ее основе разработать возможные типовые системы противопожарной защиты.

10. Аналогичный анализ необходим и для групп объектов культурного наследия с учетом возможного изменения класса функциональной пожарной опасности при приспособлении для современного использования и условий пребывания людей на объекте.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Об объектах культурного наследия (памятниках истории и культуры) народов Российской Федерации : Федер. закон РФ от 25.06.2002 № 73-ФЗ (с изм. на 07.03.2017). URL: <http://docs.cntd.ru/document/901820936> (дата обращения: 10.03.2017).
2. Технический регламент о требованиях пожарной безопасности : Федер. закон РФ от 22.07.2008 № 123-ФЗ (с изм. на 03.07.2016). URL: <http://docs.cntd.ru/document/902111644> (дата обращения: 10.03.2017).
3. ВППБ 13-01–94. Правила пожарной безопасности для учреждений культуры Российской Федерации : приказ Министерства культуры Российской Федерации от 01.11.1994 № 736. URL: <http://docs.cntd.ru/document/1200004456> (дата обращения: 10.03.2017).
4. СП 112.13330.2011. Пожарная безопасность зданий и сооружений. URL: <http://docs.cntd.ru/document/871001022> (дата обращения: 10.03.2017).
5. ТСН 21-305–2003 Санкт-Петербурга. Реконструкция зданий и помещений различных классов функциональной пожарной опасности в пределах исторически сложившихся районов Санкт-Петербурга. Требования пожарной безопасности. URL: <http://docs.cntd.ru/document/1200032049> (дата обращения: 10.03.2017).
6. ТСН 30-306–2002 Санкт-Петербурга. Реконструкция и застройка исторически сложившихся районов Санкт-Петербурга. URL: <http://docs.cntd.ru/document/1200031464> (дата обращения: 10.03.2017).
7. Еремина Т. Ю., Тихонова Н. В. Пожарная безопасность исторических зданий // Пожарная безопасность. — 2017. — № 2 (принята к печати).
8. CFPA E Guideline No 30:2013 F. Managing fire protection in historic buildings. URL: <http://cfpa-e.eu/cfpa-e-guidelines/guidelines-fire-protection-form/> (дата обращения: 10.03.2017).
9. NFPA 914. Code for fire protection of historic structures. 2015 Edition (Свод правил пожарной безопасности в исторических зданиях). — Quincy, MA : National Fire Protection Association, 2014. — 256 p.
10. NFPA 909. Code for the Protection of Cultural Resource Properties — Museums, Libraries, and Places of Worship. 2013 Edition (Свод правил защиты объектов культурного наследия. Музеи, библиотеки, культовые здания). — Quincy, MA : National Fire Protection Association, 2012. — 185 p.
11. СП 258.1311500.2016. Объекты религиозного назначения. Требования пожарной безопасности. URL: <http://docs.cntd.ru/document/456042677> (дата обращения: 10.03.2017).

12. 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 (с изм. на 02.12.2015). URL: <http://docs.cntd.ru/document/902167776> (дата обращения: 10.03.2017).
13. Холщевников В. В., Самошин Д. А. Эвакуация и поведение людей при пожарах. — М. : Академия ГПС МЧС России, 2009. — 212 с.
14. Гилетич А. Н., Еремина Т. Ю., Тихонова Н. В. Применение международных стандартов BS 7974 и ISO/TS 16733 при оценке пожарного риска // Пожарная безопасность. — 2013. — № 2. — С. 113–124.
15. BS 7974:2001. Application of fire safety engineering principles to the design of buildings. Code of practice (Применение принципов пожарно-технического анализа при проектировании зданий. Свод правил). — London, UK : British Standards Institution (BSI), 2001. — 34 p.
16. ISO 16733-1:2015. Fire safety engineering — Selection of design fire scenarios and design fires — Part 1: Selection of design fire scenarios (Техника пожарной безопасности. Выбор проекта сценариев пожара и расчет характеристик. Часть 1. Выбор сценария пожара). — Geneva, Switzerland : ISO, 2015. — 42 p.
17. Технический регламент о безопасности зданий и сооружений : Федер. закон от 30.12.2009 № 384-ФЗ (с изм. на 02.07.2013). URL: <http://docs.cntd.ru/document/902192610> (дата обращения: 10.03.2017).
18. Холщевников В. В., Присадков В. И., Костерин И. В. Совершенствование методологии определения расчетных величин пожарного риска в зданиях и сооружениях на основе стохастического описания определяющих их процессов и деревьев событий // Пожаровзрывобезопасность. — 2017. — Т. 26, № 1. — С. 5–17. DOI: 10.18322/PVB.2017.26.01.5-17.
19. Hansell G. O., Morgan H. P. Design approaches for smoke control in atrium buildings. — Borehamwood, UK : Building Research Establishment, 1994. — 66 p.
20. Богданов А. В. Интегрированная система пожарно-охранной безопасности крупного музейного комплекса (на примере Государственного Эрмитажа) : дис. ... канд. техн. наук. — СПб., 2004. — 177 с.
21. Богданов А. В. Фундаментальные основы и частные задачи пожарной защиты музеев // Системы безопасности. — 2014. — № 5. — С. 128–131.
22. Twilt L., Öhlin L. M. Position of fire safety of cultural heritage in the regulatory system in various European countries. Final Report, TNO Centre for Fire Research, February, 2005 (Пожарная безопасность объектов культурного наследия в нормативно-правовой базе различных европейских стран). URL: http://www.framemethod.net/indexen_html_files/wglfinalreport.pdf (дата обращения: 10.03.2017).
23. Öhlin L. M., Breunese A. Fire safety aspects in cultural heritage — a case study in historical Delft (Вопросы пожарной безопасности объектов культурного наследия — анализ проблемы на примере Делфта) // HERON. — 2005. — Vol. 50, No. 4. — P. 321–340. URL: <http://heronjournal.nl/50-4/9.pdf> (дата обращения: 10.03.2017).
24. Gordon Cooke. Upgrading the fire resistance of floors and doors in heritage buildings // International Symposium on Protection of Cultural Heritage Buildings from Fire, Kyoto, Japan, April 6–7, 2003. — 20 p. URL: <http://www.cookeonfire.com/pdfs/22.pdf> (дата обращения: 10.03.2017).

Материал поступил в редакцию 16 марта 2017 г.

Для цитирования: Присадков В. И., Еремина Т. Ю., Тихонова Н. В. Предпосылки разработки свода правил “Противопожарная защита объектов культурного наследия” // Пожаровзрывобезопасность. — 2017. — Т. 26, № 5. — С. 45–53. DOI: 10.18322/PVB.2017.26.05.45-53.

English

DEVELOPMENT BASIS FOR CODE OF PRACTICE “FIRE PROTECTION OF CULTURAL HERITAGE OBJECTS”

PRISADKOV V. I., Doctor of Technical Sciences, Professor, Chief Researcher,
All-Russian Research Institute for Fire Protection of Emercom of Russia
(VNIPO, 12, Moscow Region, Balashikha, 143903, Russian Federation)

EREMINA T. Yu., Doctor of Technical Sciences, Professor, Senior Researcher of Management Issues Academic Organization, State Fire Academy of Emercom of Russia (Borisa Galushkina St., 4, Moscow, 129366, Russian Federation; e-mail: main@stopfire.ru)

TIKHONOVA N. V., Leading Engineer, International Scientific Innovative Center of Construction and Fire Safety, Ltd. (Uralskaya St., 13, Saint Petersburg, 199155, Russian Federation; e-mail: risk@stopfire.ru)

ABSTRACT

Effective use of cultural heritage objects is nowadays a very actual problem. Main trends of cultural heritage object modification for modern use are multifunctional complexes, business centers, hotels, educational institutions. Also there is successful experience of modification of industrial architecture into exhibition areas, concert venues, art-venues, modification of historic building complexes.

Russian and international normative documents with fire safety requirements for cultural heritage objects are analyzed in this work with respect to design experience, and improvement proposals are developed.

Reconstruction, major repair, modification for modern use for cultural heritage objects can result in contradictions between requirements of Federal Law No. 123 "Fire Safety Regulation" and space-planning and construction solutions which are protected as cultural heritage elements.

At the same time, some space-planning solutions at the objects can't be taken into account in fire risk assessment according to approved technique (RF Emercom Order on 30.06.2009 No. 382). As a result it's difficult to accept appropriate use of this technique in such cases.

It's suggested to develop Code of Practice which could explain and validate design solutions in such cases.

Before technique actualization it's suggested to develop Special Technical Regulations for fire protection of these objects. Building elements, which are not taken into account in the technique, can be included in fire assessment by expert coefficients to use upper limits of evacuation time in the assessment.

Actual for practice specialists, typical for cultural heritage object problems are considered in this work: protection of multi-storied spaces with open stairways; automatic fire-suppression installations; historic doors in fire partitions; smoke control systems. Suggestions for application of such fire protection facilities at cultural heritage objects are formulated.

Keywords: cultural heritage objects; modification of cultural heritage objects for modern use; fire protection; fire risk assessment technique; multi-storied space; automatic fire-suppression installation; fire door.

REFERENCES

1. *On cultural heritage objects (historic and cultural monuments) of nations in Russian Federation.* Federal Law on 25.06.2002 No. 73 (with changes on 07.03.2017) (in Russian). Available at: <http://docs.cntd.ru/document/901820936> (Accessed 10 March 2017).
2. *Technical regulation of fire safety requirements.* Federal Law on 22.07.2008 No. 123 (with changes on 03.07.2016) (in Russian). Available at: <http://docs.cntd.ru/document/902111644> (Accessed 10 March 2017).
3. *VPPB 13-01-94. Fire safety rules for cultural institutions in Russian Federation.* Order of Ministry of Culture of the Russian Federation on 01.11.1994 No. 736 (in Russian). Available at: <http://docs.cntd.ru/document/1200004456> (Accessed 10 March 2017).
4. *Set of rules 112.13330.2011. Fire safety of buildings and works* (in Russian). Available at: <http://docs.cntd.ru/document/871001022> (Accessed 10 March 2017).
5. *Saint Petersburg regional construction norms 21-305-2003. Reconstruction of buildings and rooms of different fire danger in historically formed districts of Saint Petersburg. Fire safety requirements* (in Russian). Available at: <http://docs.cntd.ru/document/1200032049> (Accessed 10 March 2017).
6. *Saint Petersburg regional construction norms 30-306-2002. Reconstruction and building in Saint Petersburg historic districts* (in Russian). Available at: <http://docs.cntd.ru/document/1200031464> (Accessed 10 March 2017).

7. Eremina T. Yu., Tikhonova N. V. Fire safety in historic buildings. *Pozharnaya bezopasnost / Fire Safety*, 2017, no. 2 (in press) (in Russian).
8. *CFPA E Guideline No. 30:2013 F. Managing fire protection in historic buildings*. Available at: <http://cfpa-e.eu/cfpa-e-guidelines/guidelines-fire-protection-form/> (Accessed 10 March 2017).
9. *NFPA 914. Code for fire protection of historic structures*. 2015 Edition. Quincy, MA, National Fire Protection Association, 2014. 256 p.
10. *NFPA 909. Code for the Protection of Cultural Resource Properties — Museums, Libraries, and Places of Worship*. 2013 Edition. Quincy, MA, National Fire Protection Association, 2012. 185 p.
11. *Set of rules 258.1311500.2016. Buildings for using in religious purposes. Fire safety requirements* (in Russian). Available at: <http://docs.cntd.ru/document/456042677> (Accessed 10 March 2017).
12. *Procedure for fire risk determining in buildings and structures of different fire danger*. Order of Emercom of Russian on 30.06.2009 No. 382 (with changes on 02.12.2015) (in Russian). Available at: <http://docs.cntd.ru/document/902167776> (Accessed 10 March 2017).
13. Kholshchevnikov V. V., Samoshin D. A. *Evacuation and occupant behavior at fires*. Moscow, State Fire Academy of Emercom of Russian Publ., 2009. 212 p. (in Russian).
14. Giletich A. N., Eremina T. Yu., Tikhonova N. V. Application of International Standards BS 7974 and ISO/TS 16733 to probabilistic assessment of fire risk. *Pozharnaya bezopasnost / Fire Safety*, 2013, no. 2, pp. 113–124 (in Russian).
15. *BS 7974:2001. Application of fire safety engineering principles to the design of buildings. Code of practice*. London, UK, British Standards Institution (BSI), 2001. 34 p.
16. *ISO 16733-1:2015. Fire safety engineering — Selection of design fire scenarios and design fires — Part 1: Selection of design fire scenarios*. Geneva, Switzerland, ISO, 2015. 42 p.
17. *Technical regulation of buildings and structures safety*. Federal Law on 30.12.2009 No. 384 (with changes on 02.07.2013) (in Russian). Available at: <http://docs.cntd.ru/document/902192610> (Accessed 10 March 2017).
18. Kholshchevnikov V. V., Prisdakov V. I., Kosterin I. V. Improvement methodology for determining the calculated value of the fire risk in buildings and structures based on stochastic description of determining their processes and trees events. *Pozharovzryvbezopasnost / Fire and Explosion Safety*, 2017, vol. 26, no. 1, pp. 5–17 (in Russian). DOI: 10.18322/PVB.2017.26.01.5-17.
19. Hansell G. O., Morgan H. P. *Design approaches for smoke control in atrium buildings*. Borehamwood, UK, Building Research Establishment, 1994. 66 p.
20. Bogdanov A. V. *Integrated fire safety and security system for big museum complex (case study of State Hermitage)*. Cand. tech. sci. diss. Saint Petersburg, 2004. 177 p. (in Russian).
21. Bogdanov A. V. Fundamental basis and specific problems of museum fire safety. *Sistemy bezopasnosti / Security and Safety*, 2014, no. 5, pp. 128–131 (in Russian).
22. Twilt L., Öhlin L. M. *Position of fire safety of cultural heritage in the regulatory system in various European countries*. Final Report, TNO Centre for Fire Research, February, 2005. Available at: http://www.framemethod.net/indexen_html_files/wg1finalreport.pdf (Accessed 10 March 2017).
23. Öhlin L. M., Breunese A. Fire safety aspects in cultural heritage — a case study in historical Delft. *HERON*, 2005, vol. 50, no. 4, pp. 321–340. Available at: <http://heronjournal.nl/50-4/9.pdf> (Accessed 10 March 2017).
24. Gordon Cooke. Upgrading the fire resistance of floors and doors in heritage buildings. In: *International Symposium on Protection of Cultural Heritage Buildings from Fire, Kyoto, Japan, April 6–7, 2003*. 20 p. Available at: <http://www.cookeonfire.com/pdfs/22.pdf> (Accessed 10 March 2017).

For citation: Prisdakov V. I., Eremina T. Yu., Tikhonova N. V. Development basis for code of practice “Fire protection of cultural heritage objects”. *Pozharovzryvbezopasnost / Fire and Explosion Safety*, 2017, vol. 26, no. 5, pp. 45–53 (in Russian). DOI: 10.18322/PVB.2017.26.05.45-53.

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)

Д. А. САМОШИН, канд. техн. наук, доцент кафедры пожарной безопасности в строительстве, Академия ГПС МЧС России (Россия, 129366, г. Москва, ул. Бориса Галушкина, 4; e-mail: inbox-d@mail.ru)

Т. Ж. ШАХУОВ, адъюнкт кафедры пожарной безопасности в строительстве, Академия ГПС МЧС России (Россия, 129366, г. Москва, ул. Бориса Галушкина, 4; e-mail: Agps_talga@mail.ru)

УДК 614.8

ЗАВИСИМОСТИ МЕЖДУ ПАРАМЕТРАМИ ЛЮДСКИХ ПОТОКОВ ПРИ ЭВАКУАЦИИ ИЗ МЕЧЕТЕЙ

Представлены результаты исследований параметров движения людских потоков при эвакуации из мечетей. Проанализирован демографический состав функционального контингента и поведение людей в мечетях в дни коллективных молитв. Выявлены характерные особенности размещения людей в молельных залах мечети, отличающие его от размещения людей во время молитв в залах иных вероисповеданий, что определяет специфику их объемно-планировочных решений и формирования людских потоков при эвакуации после богослужения. Описана методика проведенных натурных наблюдений. Впервые установлен вид зависимостей между основными параметрами людского потока $V_D = \varphi(D)$ при его движении по наблюдаемым видам пути при эвакуации из мечетей.

Ключевые слова: эвакуация; людской поток; мечети; натурные наблюдения; параметры движения.

DOI: 10.18322/PVB.2017.26.05.54-65

Введение

Независимо от того, верующий вы или атеист, вас не может миновать то сакральное ощущение, которое охватывает людей на протяжении веков при виде храмовых сооружений различных конфессий (рис. 1 и 2). Сакральное — необязательно религиозное. Это может быть и то возвышенное, что поднимает вашу душу над обыденностью повседневного и что очень тонко описал знаменитый французский композитор Гектор Берлиоз: «Ничто меня так не поразило, как памятник древнерусского зодчества в селе Коломенском. Многое я видел, многим я любовался, многое поражало меня, но время, древнее время в России, которое оставило свой памятник в этом селе, *было для меня чудом из чудес*. Я видел Страсбургский собор, который строился веками, я стоял вблизи Миланского собора, но, кроме наклепанных украшений, я ничего не нашел. *А тут передо мной предстала красота целого. Во мне все дрогнуло*. Это была таинственная тишина. Гармония красоты законченных форм. Я видел какой-то новый вид архитектуры. Я видел стремление ввысь, и долго я стоял, ошеломленный».

Этим общечеловеческим духовным «стремлением ввысь», понимаемым каждым в зависимости

от полученного воспитания, объясняется не прекращающееся и сегодня стремление людей к религии и большое число прихожан в молельных домах (собо-ры, церкви, мечети, синагоги и т. п.). Их использование как зданий массовых собраний [1] определяет необходимость обеспечения безопасности людей при любых условиях эксплуатации [2], в первую очередь при пожаре [3, 4]. Имеется несколько зарубежных [5–7] и отечественных [8–10] источников, в которых рассматриваются вопросы пожарной безопасности культовых зданий и сооружений. Однако в этих работах отсутствуют данные о составе основного функционального контингента в рассматриваемых зданиях, специфике организации функционального процесса (моления) в зданиях различных конфессий, расчетные величины параметров людских потоков.

Цели и задачи

В настоящее время главным направлением в подходах к обеспечению пожарной безопасности, основанных на концепции «приемлемого риска», является снижение вероятности гибели людей [3, 4]. Основным критерием оценки соответствия величины пожарного риска нормативному значению



Рис. 1. Собор Парижской Богоматери в Нотр-Дам-де-Пари (время строительства — 1163–1345 гг.) (а) и Страсбургский собор (начало строительства — 1015 г.) (б)

$Q_{\text{в}}^{\text{н}} = 10^{-6} \text{ год}^{-1}$ является проведение успешной эвакуации людей из здания. Вероятность эвакуации людей $P_{\text{эв}}$ — один из составных компонентов, используемых в расчете индивидуального пожарного риска при возникновении пожара и в зданиях мечетей.



Рис. 2. Церковь Вознесения в Коломенском (а) и Голубая мечеть или Мечеть Султанахмет (*Sultanahmet Camii*) в Стамбуле — выдающийся образец исламской и мировой архитектуры (строительство 1609–1616 гг., вместимость около 10 тыс. чел.) (б)

Однако вид зависимости между параметрами движения людей, необходимый для определения величины $P_{\text{эв}}$, неизвестен, поскольку исследования в этом направлении применительно к движению в мечетях ранее никогда не проводились. Начало таким исследованиям было положено натурными наблюдениями за временем начала эвакуации после окончания службы в дни коллективных молитв [11].

Для установления вида зависимости между скоростью людских потоков в мечети и их плотностью необходимо провести серии натурных наблюдений в дни ее максимального наполнения прихожанами. Анализ данных, полученных при обработке наблюдений, позволит сформировать рекомендации по нормированию ширины эвакуационных выходов в зданиях мечетей.

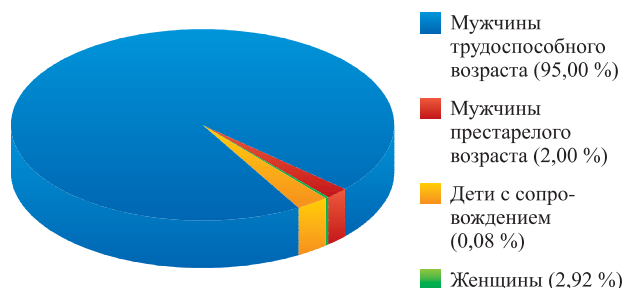


Рис. 3. Данные по посещаемости мечети различными группами прихожан в пятничные дни

Состав людского потока в мечети

Для установления демографического состава функционального контингента мечетей были проведены натурные наблюдения в дни совершения пятничных молитв в Московской центральной мечети с декабря 2015 г. по апрель 2016 г. В результате установлено, что в каждый из дней наблюдений мечеть посещало около 10 тыс. чел. Полученные результаты представлены на рис. 3.

Небольшое количество женщин и детей несовершеннолетнего возраста, посещающих мечеть, объясняется тем, что религия разрешает им совершать молитву дома, не приходя в дома Аллаха. Поэтому свыше 95 % людей, посещающих мечеть, — это мужчины трудоспособного возраста (молодежь и люди, которые по своим физиологическим возможностям могут передвигаться с высокой скоростью). Остальные 5 % приходятся на женщин, людей пожилого возраста, детей, а также маломобильные группы населения. Поскольку для женщин в мечети предусмотрен обособленный выход, исследование параметров их движения не проводилось. Граждане престарелого возраста и маломобильные группы населения хоть и составляют небольшой процент в потоке, тем не менее делают его неоднородным, с преобладающим числом людей трудоспособного возраста.

Особенности движения людей в мечетях

Движение людей в мусульманских культовых сооружениях имеет специфический характер, который ранее в исследованиях не рассматривался и который обусловлен определенной плотностью скопления людей, рассредоточенных по всей площади мечети (рис. 4).

Исследования показывают, что на одного молящегося приходится 0,6 м² общей площади мечети, свободной от оборудования, конструкций и элементов убранства зала. Размер этой площади определяется размерами молебельного места при положении молящегося на коленях (см. рис. 4,а). После молитвы (через 4–5 с) молящиеся поднимаются с колен (см. рис. 4,б) и поворачиваются в сторону эвакуаци-



Рис. 4. Этапы подготовки людей к эвакуации (интервал съемки 1 с): а — молитва; б — окончание молитвы; в — принятие вертикального положения; г — начало поточного движения

онных выходов (см. рис. 4,г). Поэтому при начале эвакуации формирующиеся людские потоки сразу же приобретают параметры свободного поточного движения (см. рис. 4,г и таблицу).

Такое формирование людских потоков в мечети резко отличается от их формирования в культовых учреждениях других конфессий. Так, в православных церквях люди во время молитвы стоят (по данным С. В. Беляева [1, с. 23], с плотностью 0,25 м²/чел.) В католических храмах они сидят на скамьях (подобие коротких рядов в зрелищных залах) (рис. 5), что

Классификация движения людей в интервалах плотности потоков [12]

Интервалы плотности, $\text{м}^2/\text{м}^2$	0–0,05	0,05–0,15	0,15–0,4	0,4–0,7	0,7–0,9	0,9–1,0	1,0–1,15
Условия движения	Индивидуальное	Поточное					
	свободное	свободное	без контактных помех	контактные помехи	с силовыми воздействиями		
					слитное	деформация тел	сдавливание тел

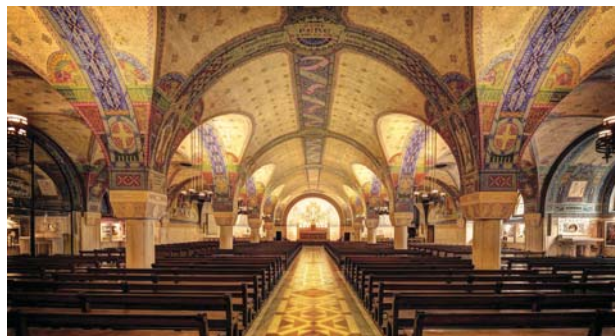


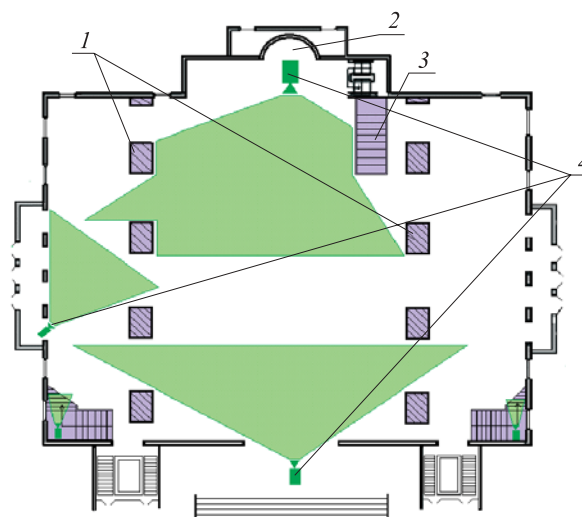
Рис. 5. Пример расположения мест для прихожан в католических храмах

определяет при их выходе в общий проход одновременное слияние и переформирование людских потоков на участках ограниченной длины [13].

Методика проведения натурных наблюдений

Как показали исследования, время начала эвакуации в мечетях в среднем составляет 4,5 с. Это говорит о том, что движение людей к выходам начинается практически одновременно, поэтому в процессе эвакуации нагрузка на эвакуационные выходы будет максимальной, а значит, именно пропускная способность проемов будет определять общее время эвакуации. В связи с этим ключом к безопасной эвакуации прихожан в мечетях является определение необходимых размеров эвакуационных путей и выходов, в особенности ширины выходов из молельных залов либо из здания. Для этого были проведены специальные натурные наблюдения за параметрами движения в мечетях. В качестве участков для наблюдения за процессом движения прихожан были приняты: молельные залы, лестничные марши, дверные проемы, участки путей перед выходом из мечети, а также прилегающая к ней территория. Для фиксации значений параметров движения людских потоков использовались камеры службы безопасности мечети и дополнительные камеры, установленные исследователями заранее (рис. 6).

В качестве видеозаписывающего оборудования, которое устанавливалось заранее, использовались видеозаписывающие регистраторы “DOD F900LS”. Их достоинством является то, что они позволяют



■ Площадь, занятая конструкциями и оборудованием
□ Полезная площадь

Рис. 6. План типовой мечети с указанием мест установки видеокамер: 1 — колонны; 2 — михраб; 3 — минбар; 4 — видеокамеры

осуществлять съемку с большим углом обзора — 120° , достаточным для получения необходимых данных на рассматриваемых участках. Высокое разрешение отснятого видео (1920×1080) и высокоскоростная съемка (30–60 кадров в секунду) также относятся к достоинствам данного оборудования.

Параметры движения людей в потоке определялись с помощью специальной масштабной сетки с размером ячеек 1×1 м, которая натягивалась над участками до натурных наблюдений, фиксировалась видеокамерами, а затем удалялась.

После того как при просмотре видео появлялись первые кадры видеозаписи, на которых запечатлена масштабная сетка, видео останавливали (пауза) и контур сетки переносили на дисплей монитора. Получив на мониторе масштабную сетку, продолжали просмотр отснятых кадров видео, на которых людские потоки двигаются по установленному участку пути, как бы проходя через ячейки сетки, нанесенные на дисплей монитора (рис. 7).

После получения видеозаписей на персональном компьютере проводилась обработка полученных

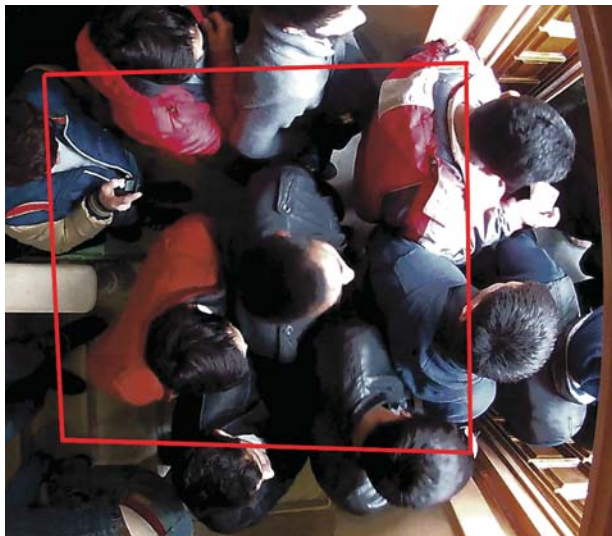


Рис. 7. Фрагмент видеозаписи процесса движения людей на выходе из мечети

данных с помощью программ *Quick Time* и *Screen Marker* для дальнейшего анализа.

После того как человек на видео переступал границу ячейки масштабной сетки, подсчитывалось количество находящихся перед ним людей в этой ячейке и тем самым определялась плотность потока D_i (чел./м²), при которой наблюдаемый (i -й) человек проходил расстояние $l = 1$ м (равное длине ячейки) за определенное количество кадров (тем самым определялся интервал времени t). Скорость перемещения человека $V_{\text{пер}}$ (м/мин) за n кадров наблюдения за ним определялась по формуле

$$V_{\text{пер}} = \frac{l}{t} 60. \quad (1)$$

Определение скорости движения через проем имеет некоторые отличительные особенности по сравнению с участками других видов пути, поскольку длина участка пути в проеме равна нулю. При движении через проем подсчитывалось количество людей N_t , проходящих через него за определенный интервал времени t . Величина t определялась продолжительностью существования перед границей проема конкретного значения плотности D_t . Затем рассчитывалась интенсивность движения q_D (чел./м·мин) через проем шириной δ (м) при наблюдаемой в течение интервала времени t (мин) плотности потока D (чел./м²) перед ним:

$$q_D = N_t / (\delta t), \quad (2)$$

а затем скорость V_D (м/мин) перехода через границу проема при плотности потока D :

$$V_D = q_D / D. \quad (3)$$

Полученные таким образом эмпирические данные указывают лишь на тенденцию проявления скры-

той зависимости между параметрами движения людских потоков и поэтому требуют установления математической зависимости, которая бы объективно отражала реальность. В данной работе для установления расчетных зависимостей между скоростью движения и плотностью людского потока [14] использовалась методология, опубликованная в работе [15] и апробированная впоследствии во многих исследованиях [16–25].

Результаты и их обсуждение

Установление вида зависимостей между плотностью и скоростью потоков людей и расчетных значений их параметров

Скорость людского потока при его плотности D_j на j -м виде пути описывается в общем виде как средняя скорость движения людей в нем V_{Dj} :

$$V_{Dj} = V_{0j} (1 - R_{Dj}), \quad (4)$$

где V_{0j} — случайная величина скорости свободного движения людского потока по j -му виду пути, когда значение плотности не оказывает на нее влияния, м/мин;

R_{Dj} — функция, отражающая степень (силу) влияния внешнего фактора на сенсорную систему человека, формирующую интенсивность реакции (в данном случае скорости движения) человека.

Эмпирические значения R_{Dj} для каждого интервала плотности во всех сериях проведенных натуральных наблюдений определяются по формуле

$$R_{Dj} = \Delta V_{Dj} / V_{0j}, \quad (5)$$

где $\Delta V_{Dj} = m(V_{0j}) - m(V_{Dj})$;

m — математическое ожидание величин V_{Dj} и V_{0j} .

В основе проявляющегося влияния плотности людского потока на его скорость лежат психофизические и психофизиологические закономерности [26–28] взаимосвязи физических характеристик различного характера стимулов, порождаемых плотностью людского потока, с интенсивностью ощущений, реакцией на которые и является изменение скорости движения людей:

$$R_{Dj} = a_j \ln (D_j / D_{0j}), \quad (6)$$

где D_j — значение плотности людского потока, при котором определяется значение R_{Dj} ;

D_{0j} — пороговое значение плотности, по достижении которого она становится фактором, оказывающим влияние на скорость движения людей в потоке;

a_j — эмпирический коэффициент, отражающий интенсивность воздействия плотности при движении по j -му виду пути.

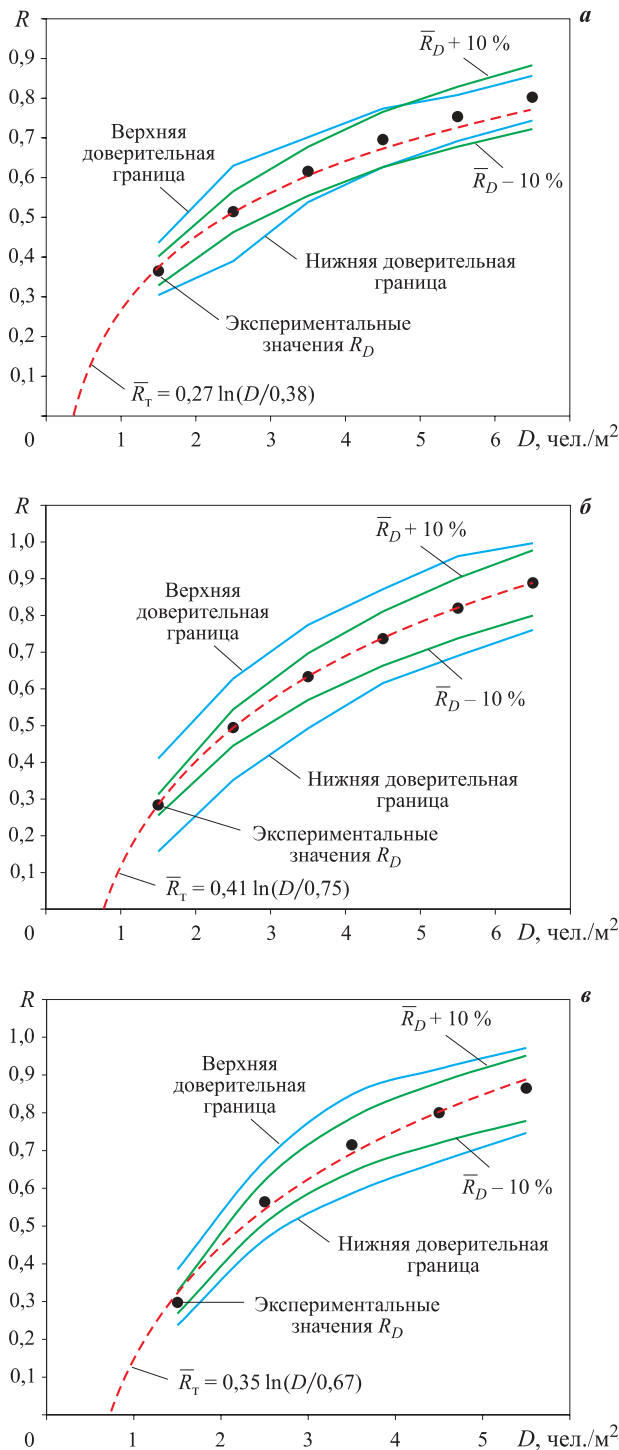


Рис. 8. Аппроксимация зависимости $R = (f)D$ при движении людского потока по горизонтальному пути (а), лестнице вниз (б) и через дверной проем (в)

Коэффициенты a_j и D_{0j} в приведенном выше выражении были определены методом средних и методом наименьших квадратов с помощью программы *Microsoft Excel*. Результаты выполненной аппроксимации $R_j = \varphi D$ проиллюстрированы на рис. 8.

Зависимости скорости движения потока от его плотности по горизонтальному пути и лестнице вниз показаны на рис. 9.

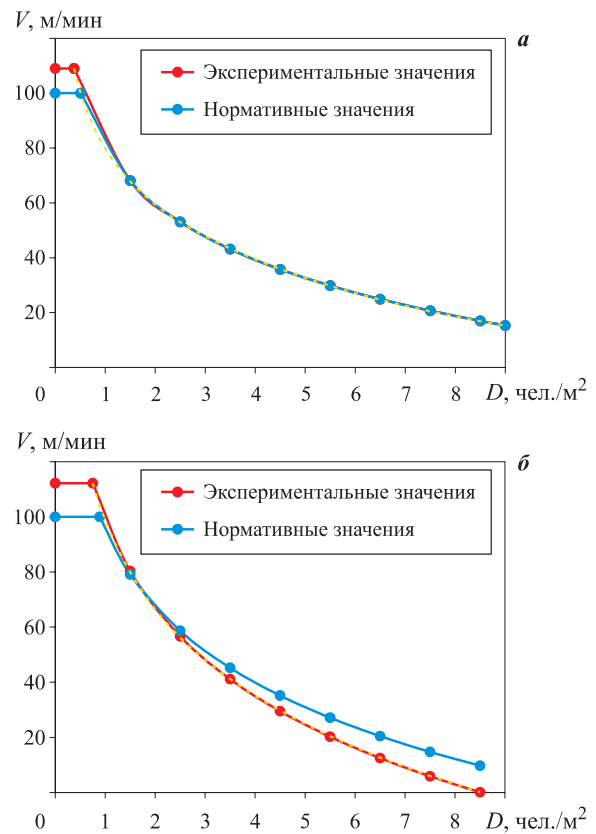


Рис. 9. Зависимость скорости движения потока по горизонтальному пути (а) и лестнице вниз (б) от плотности людского потока

Высокие теоретические корреляционные отношения, полученные во всех приведенных зависимостях ($\eta_T = 0,999$), определяют установленные связи практически как функциональные ($\eta_T = 1$), что указывает на наличие сильной корреляционной связи между скоростью движения людей в потоке и его плотностью. Это в очередной раз подтверждает вид регрессионной зависимости, связывающей скорость движения людского потока и плотность на основе законов психофизики, выведенных в работе [15].

Рекомендации по нормированию размеров эвакуационных путей и выходов в зданиях мечетей

Известно, что демографический состав прихожан в мечети разнородный, в том числе пожилые люди, не все из которых способны самостоятельно передвигаться: часть из них приводят на службы или привозят на креслах-колясках их ближайшие родственники. Исходя из этого, при проектировании зданий мечетей должны выполняться эргономические условия для комфортного нахождения в них маломобильных групп населения. При организации эвакуации наличие таких групп в составе потока диктует необходимость обеспечить для более физически сильных людей возможность обгона маломобильных групп людей.

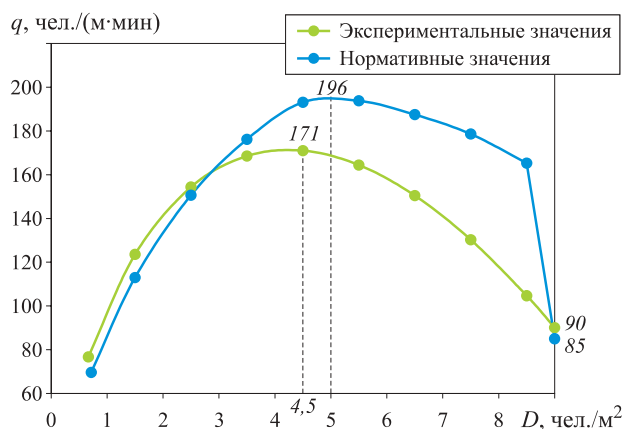


Рис. 10. Зависимость интенсивности движения людского потока через проем от его плотности

Ширину выходов следует назначать пропорционально ширине потока, кратно ширине человека в плечах ($b = 0,6$), но не менее ширины кресла-коляски ($b = 0,9$ м).

Ширина двери δ должна рассчитываться по формуле

$$\delta = 0,6n \geq 0,9, \quad (7)$$

где n — количество человек, одновременно проходящих через проем.

На этом основании можно сделать вывод, что ширина дверного проема может быть равна: 0,9; 1,2; 1,8; 2,4 и т. д.

Сравнение значений интенсивности движения в дверном проеме q , полученных в данном исследовании экспериментальным путем, с нормативными показывает их различие (рис. 10): значение $q_{\max} = 196$ чел./м·мин, являющееся нормированным для дверных проемов, отличается на 14,5 % от экспериментального значения $q_{\max} = 171$ чел./м·мин.

Для объяснения этого расхождения может быть использовано несколько аспектов, в том числе наблюдающиеся в последние десятилетия физиологические и демографические изменения в структуре народонаселения.

На установление нормативных значений скорости и интенсивности движения людского потока в зависимости от его плотности большое влияние оказали данные, полученные в результате эксперимента, проведенного более 40 лет назад с молодыми людьми на специально оборудованном манеже [29]. А как известно, в целом происходит постоянная акселерация общества, т. е. человечество постепенно «растет». Если 50 лет назад средний рост человека был 160 см, то сейчас на 5 см больше. Увеличилась и его масса в среднем на 1 кг [30]. В связи с этим ко-

личество людей, приходящееся на 1 м², стало меньше, следовательно, максимальная интенсивность движения, соответственно, снизилась. В то же время зарубежные [31] и отечественные [32] исследования говорят о том, что основные массивы данных, используемые для существующих руководящих документов, базируются на эмпирических данных полувековой давности [33, 34], которые не учитывают происшедших за это время изменений в демографической структуре населения, связанных с его старением и снижением подвижности в результате ожирения людей всех возрастов [35].

Выводы

Присутствие большого количества прихожан в мечети определяет необходимость обеспечения их безопасности при пожаре. Особенностью процесса эвакуации из мечетей является высокая численность людей, малое время начала эвакуации и, как следствие, почти мгновенное образование потоков высокой плотности.

На основе устоявшейся в теории движения людских потоков методики в мечетях г. Москвы проведены серии натурных наблюдений в дни их максимального заполнения прихожанами.

В результате исследования впервые установлены зависимости между параметрами людского потока $V_D = \varphi(D)$ при его движении по наблюдаемым видам пути при эвакуации из мечетей. Высокие теоретические корреляционные отношения, полученные во всех приведенных зависимостях ($\eta_t = 0,999$), определяют установленные связи практически как функциональные ($\eta_t = 1$), что указывает на наличие сильной корреляционной связи между скоростью движения потока и его плотностью.

Установлено, что для обеспечения беспрепятственной эвакуации ширину выходов следует назначать пропорционально ширине в плечах людей в потоке ($b = 0,6$), но не менее ширины кресла-коляски ($b = 0,9$ м). Таким образом, ширина дверного проема должна быть не менее: 0,9; 1,2; 1,8; 2,4 м и т. д.

Определено, что в мечетях, как правило, продолжительность эвакуации определяется временем движения через дверные проемы. Максимальная интенсивность движения через дверной проем, определенная в результате экспериментов, ниже на 14,5 %, чем существующие сегодня в нормах данные. Это обусловлено наблюдающимися в последние десятилетия физиологическими и демографическими изменениями в структуре народонаселения.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Беляев С. В. Эвакуация зданий массового назначения. — М.: Изд-во Всесоюзной академии архитектуры, 1938. — 72 с.

2. Технический регламент о безопасности зданий и сооружений : Федер. закон от 30.12.2009 № 384-ФЗ (с изм. на 02.07.2013). URL: <http://docs.cntd.ru/document/902192610> (дата обращения: 10.03.2017).
3. Технический регламент о требованиях пожарной безопасности : Федер. закон от 22.07.2008 № 123-ФЗ (с изм. на 03.07.2016). URL: <http://docs.cntd.ru/document/902111644> (дата обращения: 10.03.2017).
4. Методика определения расчетных величин пожарного риска в зданиях, сооружениях и строениях различных классов функциональной пожарной опасности : приказ МЧС России от 30.06.2009 № 382 (в ред. от 12.12.2011) // Российская газета. — 28.08.2009. — № 161.
5. *Arvidson M.* Experience with fire suppression installations for wood churches in Sweden // *Journal of Fire Protection Engineering*. — 2008. — Vol. 18, issue 2. — P. 141–159. DOI: 10.1177/1042391507086431.
6. *Copping A. G.* The development of a fire safety evaluation procedure for the property protection of parish churches // *Fire Technology*. — 2002. — Vol. 38, No. 4. — P. 319–334. DOI: 10.1023/A:1020114314974.
7. *Akel Kahera, Latif Abdumalik, Craig Anz.* Design criteria for mosques and islamic centers. Art, architecture, and worship. — Oxford, UK : Elsevier Ltd., 2009. — 94 p.
8. *Шидловский Г. Л., Таранцев А. А.* Основные проблемы обеспечения безопасности людей при эвакуации людей из культовых зданий // VI междунар. науч.-практ. конф. “Подготовка кадров в системе предупреждения и ликвидации последствий ЧС”. — СПб. : Санкт-Петербургский университет ГПС МЧС России, 2007.
9. *Самошин Д. А., Матвеева Н. П.* Проблемы безопасной эвакуации людей из культовых зданий православной церкви // *Технологии техносферной безопасности : интернет-журнал*. — 2013. — Вып. 6(52). — 7 с. URL: <http://agps-2006.narod.ru/ttb/2013-6/03-06-13.ttb.pdf> (дата обращения: 25.03.2017).
10. *Лицкевич В. В., Присадков В. И., Мусликова С. В., Костерин И. В., Соболев А. Н., Гилетич А. Н.* Противодымная вентиляция с естественным побуждением для молельных залов храмов // *Пожарная безопасность*. — 2016. — № 1. — С. 65–68.
11. *Шахуов Т. Ж., Самошин Д. А.* Исследование времени начала эвакуации людей в мечетях // *Пожары и чрезвычайные ситуации: предотвращение, ликвидация*. — 2017. — № 1. — С. 20–24.
12. *Предтеченский В. М., Милинский А. И.* Проектирование зданий с учетом организации движения людских потоков : учебное пособие для вузов. — 2-е изд., доп. и перераб. — М. : Стройиздат, 1979. — 375 с.
13. *Предтеченский В. М., Холицевников В. В.* Расчет переформирования людских потоков на участках ограниченной длины // *Известия высших учебных заведений. Строительство и архитектура*. — 1971. — № 4. — С. 67–76.
14. *Холицевников В. В.* Закономерности связи между параметрами людских потоков : диплом № 24-S на открытие в области социальной психологии. — М. : Российская академия естественных наук, Международная академия авторов научных открытий и изобретений, Международная ассоциация авторов научных открытий, 2005.
15. *Холицевников В. В.* Людские потоки в зданиях, сооружениях и на территории их комплексов : дис. ... д-ра техн. наук. — М. : МИСИ, 1983. — 442 с.
16. *Исаевич И. И.* Разработка основ многовариантного анализа планировочных решений станций и пересадочных узлов метрополитена на основе моделирования закономерностей движения людских потоков : дис. ... канд. техн. наук. — М. : МИСИ, 1990. — 245 с.
17. *Айбуев З. С.-А.* Формирование людских потоков на предзаводских территориях крупных промышленных узлов машиностроительного профиля : дис. ... канд. техн. наук. — М. : МИСИ, 1989. — 243 с.
18. *Холицевников В. В.* Исследования людских потоков и методология нормирования эвакуации людей из зданий при пожаре. — М. : МИПБ МВД РФ, 1999. — 93 с.
19. *Kholshchevnikov 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.
20. *Холицевников В. В., Самошин Д. А., Исаевич И. И.* Натурные наблюдения людских потоков : учебное пособие. — М. : Академия ГПС МЧС России, 2009. — 191 с.
21. *Парфененко А. П.* Нормирование требований пожарной безопасности к эвакуационным путям и выходам в зданиях детских дошкольных образовательных учреждений : дис. ... канд. техн. наук. — М. : Академия ГПС МЧС России, 2012. — 153 с.
22. *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, No. 5-6. — P. 349–366. DOI: 10.1002/fam.2152.

23. Кудрин И. С. Влияние параметров движения людских потоков при пожаре на объемно-планировочные решения высотных зданий : дис. ... канд. техн. наук. — М. : Академия ГПС МЧС России, 2013. — 190 с.
24. Истратов Р. Н. Нормирование требований пожарной безопасности к эвакуационным путям и выходам в стационарах социальных учреждений по обслуживанию граждан пожилого возраста : дис. ... канд. техн. наук — М. : Академия ГПС МЧС России, 2014. — 160 с.
25. Слюсарев С. В. Нормирование требований пожарной безопасности к эвакуационным путям и выходам для детей с ограниченными возможностями здоровья в зданиях с их массовым пребыванием : дис. ... канд. техн. наук. — М. : Академия ГПС МЧС России, 2016. — 182 с.
26. Fechner G. Th. Elemente der psychophysik. — 2-te Auflagen. — Leipzig : Breitkopf und Härtel, 1889. — 378 s. (in Germany).
27. Забродин Ю. М., Лебедев А. Н. Психология и психофизика — М. : Наука, 1977. — 288 с.
28. Волков П. П., Оксень В. Н. Информационное моделирование эмоциональных состояний. — Минск : Высшая школа, 1978. — 128 с.
29. Копылов В. А. Исследование параметров движения людей при вынужденной эвакуации : дис. ... канд. техн. наук. — М. : МИСИ, 1974.
30. Рост человека / Википедия. Свободная энциклопедия. URL: https://ru.wikipedia.org/wiki/Рост_человека (дата обращения: 12.04.2017).
31. Thompson P., Nilsson D., Boyce K., McCrath D. Evacuation models are running out time // Fire Safety Journal. — 2015. — Vol. 78. — P. 251–261. DOI: 10.1016/j.firesaf.2015.09.004.
32. Самошин Д. А. Состав людских потоков и параметры их движения при эвакуации : монография. — М. : Академия ГПС МЧС России, 2016. — 209 с.
33. Fruin J. J. Pedestrian planning and design. — New York : Metropolitan Association of Urban Designers and Environmental Planners Inc., 1971.
34. 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.). — 2nd ed. — Quincy, MA : National Fire Protection Association, 1996. — P. 3-263–3-285.
35. The 2015 Ageing report: economic and budgetary projections for the 28 EU Member States (2013–2060). — Brussels : European Commission, 2015. — 424 p.

Материал поступил в редакцию 5 мая 2017 г.

Для цитирования: Холщевников В. В., Самошин Д. А., Шахуов Т. Ж. Зависимости между параметрами людских потоков при эвакуации из мечетей // Пожаровзрывобезопасность. — 2017. — Т. 26, № 5. — С. 54–65. DOI: 10.18322/PVB.2017.26.05.54-65.

English

DEPENDENCES BETWEEN THE PARAMETERS OF HUMAN FLOWS DURING EVACUATION FROM MOSQUES

KHOLSHCHEVNIKOV V. V., Doctor of Technical Sciences, Professor of Fire Safety in Construction Department, State Fire Academy of Emercom of Russia (Borisa Galushkina St., 4, Moscow, 129366, Russian Federation; e-mail: reglament2004@mail.ru)

SAMOSHIN D. A., Candidate of Technical Sciences, Associate Professor of Fire Safety in Construction Department, State Fire Academy of Emercom of Russia (Borisa Galushkina St., 4, Moscow, 129366, Russian Federation; e-mail: inbox-d@mail.ru)

SHAKHUOV T. Zh., Postgraduate Student of Fire Safety in Construction Department, State Fire Academy of Emercom of Russia (Borisa Galushkina St., 4, Moscow, 129366, Russian Federation; e-mail: Agps_talga@mail.ru)

ABSTRACT

A large number of parishioners in the mosque determines the need to secure their safety in case of fire. For this purpose, there are defined the demographic of people in the mosque (over 95 per cent of

working age) and the rate (0.6 m² of area per one praying person of the total area of the mosque that is vacant from equipment and the elements of the decoration of the hall). The peculiarity of the evacuation process from mosques is the high number of people, the low time of the beginning of evacuation (4–5 sec) and, as a consequence, momentary formation of streams with high density.

Based on the established in the theory of human flows of methods conducting observations on location mosques of Moscow, a series of observations on location had been conducted in the days of their highest point of parishioners.

As a result of the research, based on more than 1500 measurements, the dependences between the parameters of the human flow $V_D = \varphi(D)$ for the first time had been established during its movement along the observed way during the evacuation from the mosques. The high theoretical correlation ratios obtained in all the presented dependences ($\eta_t = 0.999$) determine the established ties practically as functional ($\eta_t = 1.0$), which indicates on the presence of the strong correlational tie between the speed of parishioners movement and the density of the flow.

It is established that in order to provide free evacuation, the width of the exits should be set in proportion to the width in the shoulders of the people that make it up ($b = 0.9$ m), but not less than the width of the wheelchair ($b = 0.9$ m). In such a way the width of the doorway must be at least 0.9, 1.2, 1.8, 2.4 m etc.

In mosques, as a rule, the evacuation time is determined by the time of movement through the door openings. The maximum intensity of movement through the doorway is determined as a result of the experiments lower by 14.5 per cent than the data existing today in the standards. This is due to the physiological and demographic changes observed in last decades in the structure of the population.

Keywords: evacuation; human stream; mosques; observations on location; parameters of motion.

REFERENCES

1. Belyaev S. V. *Evakuatsiya zdaniy massovogo naznacheniya* [Public evacuation from buildings]. Moscow, All-Russian Academy of the Architecture Publ., 1938. 72 p. (in Russian).
2. *Technical regulation of buildings and structures safety*. Federal Law on 30.12.2009 No. 384 (with changes on 02.07.2013) (in Russian). Available at: <http://docs.cntd.ru/document/902192610> (Accessed 10 March 2017).
3. *Technical regulations on fire safety requirements*. Federal Law of Russian Federation on 22.07.2008 No. 123 (with changes on 03.07.2016) (in Russian). Available at: <http://docs.cntd.ru/document/902111644> (Accessed 10 March 2017).
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. *Rossiyskaya gazeta / Russian Newspaper*, 28.08.2009, no. 161 (in Russian).
5. Arvidson M. Experience with fire suppression installations for wood churches in Sweden. *Journal of Fire Protection Engineering*, 2008, vol. 18, issue 2, pp. 141–159. DOI: 10.1177/1042391507086431.
6. Copping A. G. The development of a fire safety evaluation procedure for the property protection of parish churches. *Fire Technology*, 2002, vol. 38, no. 4, pp. 319–334. DOI: 10.1023/A:1020114314974.
7. Akel Kahera, Latif Abdumalik, Craig Anz. *Design criteria for mosques and islamic centers. Art, architecture, and worship*. Oxford, UK, Elsevier Ltd., 2009. 94 p.
8. Shidlovskiy G. L., Tarantsev A. A. The main problems of ensuring the safety of people when evacuating people from religious buildings. In: *VI mezhdunarodnaya nauchno-prakticheskaya konferentsiya "Podgotovka kadrov v sisteme preduprezhdeniya i likvidatsii posledstviy ChS"* [Proceedings of VI International Scientific and Practical Conference "Training of personnel in the system of prevention and liquidation consequences of emergencies"]. Saint Petersburg, Saint Petersburg University of State Fire Service of Emercom of Russia, 2007 (in Russian).
9. Samoshin D. A., Matveeva N. P. The problems of safe evacuation of people from religious orthodox buildings. *Tekhnologii tekhnosfernoy bezopasnosti. Tekhnologii tekhnosfernoy bezopasnosti. Internet-zhurnal / Technology of Technosphere Safety. Internet-Journal*, 2013, issue 6(52). 7 p. (in Russian). Available at: <http://agps-2006.narod.ru/ttb/2013-6/03-06-13.ttb.pdf> (Accessed 25 March 2017).
10. Litskevich V. V., Prisadkov V. I., Muslakova S. V., Kosterin I. V., Sobolev A. N., Giletich A. N. Natural draught smoke ventilation for prayer halls in temples. *Pozarnaya bezopasnost / Fire Safety*, 2016, no. 1, pp. 65–68 (in Russian).

11. Shakhuvov T. Zh., Samoshin D. A. Study of time of evacuation start of people in mosques. *Pozhary i chrezvychaynyye situatsii: predotvrashcheniye, likvidatsiya / Fire and Emergencies: Prevention, Elimination*, 2017, no. 1, pp. 20–24 (in Russian).
12. Predtechenskiy V. M., Milinskiy A. I. *Proyektirovaniye zdaniy s uchetom organizatsii dvizheniya lyudskikh potokov* [Planing for foot traffic flow in buildings]. Moscow, Stroyizdat, 1979. 375 p. (in Russian).
13. Predtechenskiy V. M., Kholshchevnikov V. V. Calculation of the reorganization of human flows in areas of limited length. *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedeniy. Stroitelstvo i arkhitektura / News of Higher Educational Institutions. Construction and Architecture*, 1971, no. 4, pp. 67–76 (in Russian).
14. Kholshchevnikov V. V. *Relationship between parameters of human flow. Diploma No. 24-S on the discovery in the field of social psychology*. Moscow, Russian Academy of Natural Sciences, International Academy of Authors of Scientific Discoveries and Inventions, International Association of Authors of Scientific Discoveries Publ., 2005 (in Russian).
15. Kholshchevnikov V. V. *Human flows in buildings, structures and on adjoining territories*. Dr. tech. sci. diss. Moscow, Moscow State University of Civil Engineering Publ., 1983. 442 p. (in Russian).
16. Isaevich I. I. *Development of the principles of multivariate analysis of planning decisions stations and subway hubs based on modeling patterns of human traffic*. Cand. tech. sci. diss. Moscow, Moscow State University of Civil Engineering Publ., 1990. 245 p. (in Russian).
17. Aybuev Z. S.-A. *Formation of human streams in prefactory territories of large industrial hubs of a machine-building profile*. Cand. tech. sci. diss. Moscow, Moscow State University of Civil Engineering Publ., 1989. 243 p. (in Russian).
18. Kholshchevnikov V. V. *Issledovaniya lyudskikh potokov i metodologiya normirovaniya evakuatsii lyudey iz zdaniy pri pozhare* [Research of human flows and methodology of rationing of people from buildings in case of fire]. Moscow, MIPB MVD RF Publ., 1999. 93 p. (in Russian).
19. Kholshchevnikov 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, pp. 108–118. DOI: 10.1016/j.firesaf.2007.05.005.
20. Kholshchevnikov V. V., Samoshin D. A., Isaevich I. I. *Naturnyye nablyudeniya lyudskikh potokov* [Field observations of human flows]. Moscow, State Fire Academy of Emercom of Russia Publ., 2009. 191 p. (in Russian).
21. Parfenenko A. P. *Rationing of fire safety requirements for evacuation routes and exits in buildings of preschool educational institutions*. Cand. tech. sci. diss. Moscow, State Fire Academy of Emercom of Russia Publ., 2012. 153 p. (in Russian).
22. 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, no. 5-6, pp. 349–366. DOI: 10.1002/fam.2152.
23. Kudrin I. S. *Influence of parameters of traffic flows of people in case of fire in the volumetric-planning solutions of tall buildings*. Cand. tech. sci. diss. Moscow, State Fire Academy of Emercom of Russia Publ., 2013. 190 p. (in Russian).
24. Istratov R. N. *Rationing of requirements of fire safety to evacuation ways and exits in hospitals of social establishments on service of citizens of advanced age*. Cand. tech. sci. diss. Moscow, State Fire Academy of Emercom of Russia Publ., 2014. 160 p. (in Russian).
25. Slyusarev S. V. *Standardization of fire safety requirements for evacuation routes and exits for children with disabilities in buildings with their massive stay*. Cand. tech. sci. diss. Moscow, State Fire Academy of Emercom of Russia Publ., 2016. 182 p. (in Russian).
26. Fechner G. Th. *Elemente der psychophysik*. 2-te Auflagen. Leipzig, Breitkopf und Härtel, 1889. 378 s. (in German).
27. Zabrodin Yu. M., Lebedev A. N. *Psikhologiya i psikhofizika* [Psychology and psychophysics]. Moscow, Nauka Publ., 1977. 288 p. (in Russian).
28. Volkov P. P., Oksen V. N. *Informatsionnoye modelirovaniye emotsionalnykh sostoyaniy* [Information modeling of emotional states]. Minsk, Vysshaya shkola Publ., 1978. 128 p. (in Russian).
29. Kopylov V. A. *Research of parameters of movement of people at the forced evacuation*. Cand. tech. sci. diss. Moscow, Moscow State University of Civil Engineering Publ., 1974 (in Russian).
30. Human Growth. In: *Wikipediya. Free encyclopedia* (in Russian). Available at: https://ru.wikipedia.org/wiki/Рост_человека (Accessed 12 April 2017).
31. Thompson P., Nilsson D., Boyce K., McCrath D. Evacuation models are running out time. *Fire Safety Journal*, 2015, vol. 78, pp. 251–261. DOI: 10.1016/j.firesaf.2015.09.004.

32. Samoshin D. A. *Composition of human flows and parameters of their movement during evacuation*. Moscow, State Fire Academy of Emercom of Russia Publ., 2016. 209 p. (in Russian).
33. Fruin J. J. *Pedestrian planning and design*. New York, Metropolitan Association of Urban Designers and Environmental Planners Inc., 1971.
34. Pauls J. Movement of people. In: DiNenno P. J., Beyer C. L., Custer R. L. P., Walton W. D., Watts J. M. W., Drysdale D., Hall J. R. (eds.). *The SFPE Handbook of Fire Protection Engineering*. 2nd ed. Quincy, MA, National Fire Protection Association, 1996, pp. 3-263–3-285.
35. *The 2015 ageing report: economic and budgetary projections for the 28 EU Member States (2013–2060)*. Brussels, European Commission, 2015. 424 p.

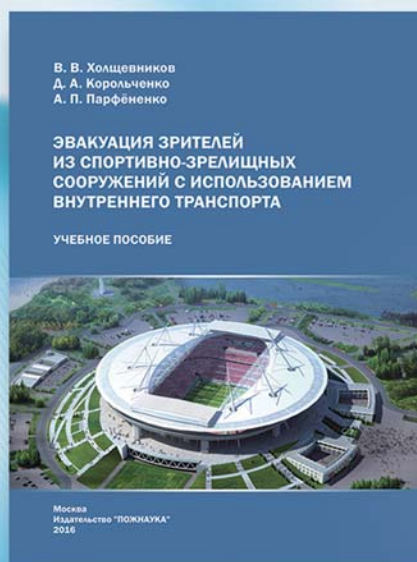
For citation: Kholshchevnikov V. V., Samoshin D. A., Shakhov T. Zh. Dependences between the parameters of human flows during evacuation from mosques. *Pozharovzryvobezopasnost / Fire and Explosion Safety*, 2017, vol. 26, no. 5, pp. 54–65 (in Russian). DOI: 10.18322/PVB.2017.26.05.54-65.



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.

Для заказа книги пишите нам по адресу:

121352, г. Москва, а/я 43,

или звоните по телефону

8 (495) 228-09-03.

Вы можете также оформить заказ через электронную почту:

mail@firepress.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; e-mail: t_54@mail.ru)

УДК 614.841

О ПРИМЕНИМОСТИ ПЕРКОЛЯЦИОННОГО МЕТОДА МОДЕЛИРОВАНИЯ РАЗВИТИЯ ПОЖАРА НА ОТКРЫТЫХ ТЕРРИТОРИЯХ

Дан краткий анализ статьи “Вероятностный подход к моделированию развития пожара на открытых территориях с применением перколяционного процесса и функции нейронной сети”, опубликованной в журнале “Пожаровзрывобезопасность”, № 2 за 2017 г. Показано, что применение перколяционных методов к развитию пожаров в сельских населенных пунктах является некорректным. Рекомендовано рассмотреть возможность описания управления тушением таких пожаров с помощью нейросетевых технологий.

Ключевые слова: пожар; сельские населенные пункты; тушение; перколяция; нейросетевые методы.

В журнале “Пожаровзрывобезопасность”, № 2 за 2017 г. (с. 44–53) опубликована статья канд. техн. наук Ф. А. Абдулalieва и др. “Вероятностный подход к моделированию развития пожара на открытых территориях с применением перколяционного* процесса и функции нейронной сети”. В ней рассмотрен якобы новый подход к прогнозированию распространения пожара в сельских населенных пунктах (далее — СНП). Показано, что динамика развития пожаров в СНП носит труднопредсказуемый характер, что обуславливает необходимость применения нестандартного математического аппарата — перколяционного анализа и теории нейронных сетей.

По поводу этой статьи необходимо отметить следующее.

1. В названии статьи термин “открытые территории” использован не совсем корректно, так как в самой статье речь идет об СНП, что и требовалось отразить в названии. А “открытые территории” — слишком широкое понятие. Так, например, в данной статье на рис. 5 (с. 50) показан даже лес, но можно ли его считать “открытой территорией” — вопрос. Если да, то какие тогда территории считаются “закрытыми”?

2. В аннотации статьи говорится о некоем “новом подходе”. Однако попытка описать распространение пожара в населенном пункте с применением перколяционного анализа была предпринята с участием автора еще в 2011 г. (Пожаровзрывобезопасность,

2011, т. 20, № 8, с. 25–33), что и отражено в п. 13 списка литературы. Там рассматривался процесс бесконтрольного выгорания населенного пункта в течение нескольких часов (!) без каких-либо попыток его тушения. В связи с этим пришлось разьяснять уважаемым авторам, что это является нонсенсом, так как в п. 1 ст. 76 Федерального закона № 123 [1] (он почему-то в списке литературы рассматриваемой статьи не значится) определено, что время прибытия подразделений пожарной охраны к месту вызова в сельских поселениях составляет не более 20 мин. А просто созерцать гибель СНП от свободного развития пожара — это для пожарных как-то странно.

3. Уважаемым авторам следовало бы учесть следующее.

Во-первых, помимо погодных условий, развитие пожара в СНП определяется такими важными параметрами (приведенными в Федеральном законе [1]), как степень огнестойкости зданий (как правило, не выше IV и V), их класс конструктивной пожарной опасности (как правило, не выше С2–С3), скорость распространения пламени и интенсивность подачи огнетушащих веществ [2], этажность зданий (как правило, 1–2 этажа), плотность застройки и противопожарные разрывы, наличие складированных горючих материалов и автотранспортных средств, растительность и др., а также попытки жителей принять какие-либо меры по тушению до прибытия пожарных. Это, к сожалению, ни перколяционный подход, ни нейросетевые модели описать не в состоянии.

* Перколяция (от лат. percolatio) — просачивание, процеживание.

Во-вторых, тактика тушения крупных пожаров в СНП обуславливается прежде всего не столько площадью пожара на момент прибытия первого подразделения пожарной охраны (на что делают упор авторы статьи), сколько периметром пожара и необходимостью обеспечения безопасности людей, эвакуации домашних животных и недопущения распространения пожара (это изложено в учебниках пожарной тактики, например в [3]). Как показывает опыт, спасти здания пониженной степени огнестойкости после 15–20 мин развития в них пожара не представляется возможным, в связи с чем основные усилия пожарных и населения направляются на защиту соседних зданий, недопущение очаговых возгораний из-за разлета искр и головней, а также на работы по спасению материальных ценностей, разборку построек из горючих материалов на пути возможного распространения пожара, обеспечение бесперебойного водоснабжения и т. п.

4. Таким образом, применение перколяционного подхода к описанию развития пожара в СНП, как было показано еще в статье [4], противоречит основным документам пожарной охраны, игнорируя важнейшие понятия и характеристики, такие как степень огнестойкости и класс конструктивной пожарной опасности зданий, свойства веществ и материалов, тактические возможности пожарных подразделений и др. Использование же термина “перколяция” применительно к пожару представляется сомнительным.

5. Объективности ради следует отметить и положительную сторону статьи: авторы предприняли попытку описания трудноформализуемых процессов — пожаров в СНП, что актуально также для садоводств и коттеджных поселков. Было бы весьма интересно и полезно построить математическую модель управления тушением таких пожаров, например с использованием тех же нейросетевых технологий.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Технический регламент о требованиях пожарной безопасности : Федер. закон от 22.07.2008 № 123-ФЗ (в ред. от 03.07.2016). URL: <http://docs.cntd.ru/document/902111644> (дата обращения: 15.04.2017).
2. *Теребнев В. В.* Справочник руководителя тушения пожара. Тактические возможности пожарных подразделений. — М. : ПожКнига, 2004. — 248 с.
3. *Повзик Я. С.* Пожарная тактика. — М. : ЗАО “Спецтехника”, 2004. — 416 с.
4. *Таранцев А. А.* О некоторых положениях статьи “Описание развития пожара с помощью перколяционных моделей” // Пожаровзрывобезопасность. — 2011. — Т. 20, № 11. — С. 56–57.

Материал поступил в редакцию 30 апреля 2017 г.

Для цитирования: *Таранцев А. А.* О применимости перколяционного метода моделирования развития пожара на открытых территориях // Пожаровзрывобезопасность. — 2017. — Т. 26, № 5. — С. 66–68.

English

ON THE APPLICABILITY OF THE PERCOLATION MODELING METHOD OF FIRE DEVELOPMENT ON OPEN TERRITORIES

TARANTSEV A. A., Doctor of Technical Sciences, Professor, Professor of Organisation of the Fire Suppression and Rescue Department, Saint Petersburg University of State Fire Service of Emercom of Russia (Moskovskiy Avenue, 149, Saint Petersburg, 196105, Russian Federation; e-mail: t_54@mail.ru)

ABSTRACT

A brief analysis of the article “Probabilistic approach to the modeling of fire development on open land by the use percolation process and function of the neural network”, published in the journal *Pozharovzryvobezopasnost / Fire and Explosion Safety*, 2017, No. 2. Shown that the application of percolation methods to the development of fires in rural areas is incorrect. Encouraged to consider the descriptions of management of the suppression of such fires based on neural network technology.

Keywords: fire; rural settlements; fire; percolation; neural network methods.

REFERENCES

1. *Technical regulations for fire safety requirements*. Federal Law on 22. 07. 2008 No. 123 (ed. 03.07.2016). Available at: <http://docs.cntd.ru/document/902111644> (Accessed 15 April 2017) (in Russian).
2. Terebnev V. V. *Spravochnik rukovoditelya tusheniya pozhara. Takticheskiye vozmozhnosti pozhar-nykh podrazdeleniy* [Directory of the head of fire extinguishing. Tactical capabilities of fire departments]. Moscow, PozhKniga Publ., 2004. 248 p. (in Russian).
3. Povzik Ya. S. *Pozharnaya taktika* [Fire tactics]. Moscow, Spetsstekhnika Publ., 2004. 416 p. (in Russian).
4. Tarantsev A. A. About some positions of article "Percolation model of fire development". *Pozharovzryvobezopasnost / Fire and Explosion Safety*, 2011, vol. 20, no. 11, pp. 56–57 (in Russian).

For citation: Tarantsev A. A. On the applicability of the percolation modeling method of fire development on open territories. *Pozharovzryvobezopasnost / Fire and Explosion Safety*, 2017, vol. 26, no. 5, pp. 66–68 (in Russian).



Издательство «ПОЖНАУКА»

Представляет книгу

Д. Г. Пронин, Д. А. Корольченко

НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКОЕ ОБОСНОВАНИЕ РАЗМЕРОВ ПОЖАРНЫХ ОТСЕКОВ В ЗДАНИЯХ И СООРУЖЕНИЯХ : монография.

— М. : Издательство "ПОЖНАУКА", 2014. — 104 с. : ил.



Изложены современные подходы к нормированию площадей пожарных отсеков и раскрыты требования к ним. Предложен метод научно-технического обоснования размеров пожарных отсеков с учетом вероятностного подхода на основе расчета пожарного риска. Рассмотрены возможности расчета вероятностных показателей, используемых в разработанном методе. Представлены основные достижения в данном направлении отечественной и зарубежной науки; приведены сведения о положительных и отрицательных сторонах действующей системы технического регулирования.

Монография ориентирована на научных и инженерных работников, занимающихся вопросами проектирования противопожарной защиты зданий и сооружений, а также на научных и практических работников пожарной охраны, преподавателей и слушателей учебных заведений строительного и пожарно-технического профиля, специалистов страховых компаний, занимающихся вопросами оценки пожарного риска.

Монография рекомендуется к использованию при выполнении научно-исследовательских и нормативно-технических работ по оптимизации объемно-планировочных и конструктивных решений зданий и сооружений, в том числе тех, на которые отсутствуют нормы проектирования, а также при проведении оценки страхования пожарных рисков.

Разработанный метод расчета может быть положен в основу технических регламентов и сводов правил в области строительства и пожарной безопасности.

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

**ВОПРОС:**

Согласно статистике в нашей стране большое число пожаров происходит из-за некачественного монтажа электроустановок. Под некачественным монтажом подразумевают ненадежное или непрофессиональное соединение проводов и кабелей, которое приводит к возникновению переходных сопротивлений. По этой причине в местах контакта происходит локальный нагрев проводников, что зачастую становится причиной пожаров. Самым распространенным и быстрым способом соединения проводников является скрутка. Какие требования предъявляются к порядку выполнения и применения скрутки проводников при монтаже электроустановок?

ОТВЕТ:

Малоопытные монтажники, скручивая несколько проводников, дополнительно покрывают их несколькими слоями изолянты и считают такое соединение надежным и безопасным. Как показывает практика, площадь контакта таких соединений со временем уменьшается, что происходит из-за окисления токопроводящих жил и различных механических воздействий. Поэтому такой вид соединения считается пожароопасным, а его применение ограничено требованиями различных нормативных документов.

В п. 2.1.21 Правил устройства электроустановок (ПУЭ) [1] указано, что соединение, ответвление и оконцевание жил проводов и кабелей должны выполняться с помощью опрессовки, сварки, пайки или сжимов (винтовых, болтовых и т. д.). Как следует из этого пункта, такой способ соединения проводников, как скрутка, в документе отсутствует, а значит, не должен использоваться при монтаже электропроводок. Кроме того, согласно п. 2.1.25 ПУЭ [1] места соединения и ответвления жил проводников должны иметь изоляцию, равноценную изоляции самих жил этих проводов и кабелей. Следовательно, места соединений должны быть защищены качественной изоляцией, выполняющей свои функции в течение всего срока службы проводки.

При выборе способа соединения жил следует обязательно учитывать:

- материал проводника и его изоляцию;
- число и форму проводов, формирующих проводник;
- площадь поперечного сечения проводника;
- число проводников, которые подлежат соединению.

Требования к разборным и неразборным электрическим контактным соединениям шин, проводов или кабелей из меди, алюминия и его сплавов, стали, алюмомедных проводов с выводами электротехнических устройств, а также контактных соединений проводников между собой на токи от 2,5 А указаны в

ГОСТ 10434–82 [2]. В стандарте [2] также отсутствует упоминание о таком способе соединения проводников, как скрутка.

Скрутка, выполненная опытным монтажником, может прослужить много лет, так и не став причиной пожара. Тем не менее в любом случае такое *соединение следует рассматривать как временное*, которое впоследствии должно быть заменено соединением, регламентируемым нормативными документами (пайка, сварка, сжимы с помощью клеммников, соединительных изолирующих зажимов СИЗ и т. п.).

При этом следует отметить, что согласно п. 526 ГОСТ Р 50571.5.52–2011 [3] для повышения механической прочности электрических соединений следует избегать такого способа соединения, как пайка. Если все же пайка используется, то она должна быть выполнена с учетом возможных смещений, механических усилий и повышения температуры при коротких замыканиях.

Важное противопожарное требование стандарта [3], предъявляемое к контактным соединениям, заключается в том, что температура соединений при нормальном режиме эксплуатации не должна превышать нормируемого значения. Монтаж проводки должен соответствовать диапазону температур окружающей среды и гарантировать, что допустимая температура проводов (максимальная длительная рабочая температура) в нормальном режиме и в случае неисправности не будет превышена (см. табл. 52.1 [3]). Так как повышение температуры проводников влияет на состояние и срок службы изоляции, температура соединений в нормальном режиме не должна снижать эффективности изоляции проводников.

С учетом указанных в стандарте ограничений основными способами соединения проводников между собой следует считать все виды винтовых и болтовых соединений, опрессовку и сварку.

Следует также понимать, что для каждого вида соединений имеются свои ограничения по типу проводников и материалу их жил. В частности, согласно п. 3.4.7 ПУЭ [1] кабели следует соединять с помощью сжима под болт. При этом соединение двух медных жил кабеля под один винт не рекомендуется, а двух алюминиевых — не допускается. При болтовом соединении медные и алюминиевые проводники необходимо разделять стальной оцинкованной шайбой.

В заключение хотелось бы добавить, что в СНиП 3.05.06–85 (СП 76.13330.2011) [4] для высоковольтных линий до 20 кВ однопроволочные провода на сегодняшний день допускается соединять путем скрутки (в виде исключения). Однако в новой версии СП 76.13330.2016 [5] (вступает в силу 17 июня 2017 г.) вышеуказанный пункт будет изложен в следующей редакции: *“Однопроволочные провода соединять путем пайки и скрутки не допускается”*.

Таким образом, соединение проводов скруткой не обеспечивает соблюдения требований по электробезопасности и пожарной безопасности и должно использоваться только для подготовки к одному из допустимых по нормам способов соединения проводников.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Правила устройства электроустановок (ПУЭ). — 6-е изд. — М. : Энергоатомиздат, 1986.
2. ГОСТ 10434–82. Соединения контактные электрические. Классификация. Общие технические требования (в ред. 25.05.1991). — Введ. 01.01.1983. — М. : ИПК Изд-во стандартов, 1982.
3. ГОСТ Р 50571.5.52–2011/МЭК 60364-5-52:2009. Электроустановки низковольтные. Часть 5-52. Выбор и

монтаж электрооборудования. Электропроводки. — Введ. 01.01.2013. — М. : Стандартиформ, 2013.

4. СНиП 3.05.06–85 (СП 76.13330.2011). Электротехнические устройства (в ред. 01.01.2001). — Введ. 01.07.1986. — М. : Госстрой РФ, ГУП ЦПП, 2000.

5. СП 76.13330.2016 (актуализированная редакция СНиП 3.05.06–85). Электротехнические устройства. — Введ. 17.06.2017. — М. : Минстрой России, 2016.

*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)*



МАСКА ДЛЯ ПОЖАРНЫХ СО ВСТРОЕННЫМ ТЕПЛОВИЗОРОМ

Одна из главных проблем, с которой сталкиваются пожарные, — плохая видимость внутри зданий, охваченных огнем. По данным западной Ассоциации противопожарной защиты, большинство несчастных случаев с пожарными происходит не от пламени, а по причине задымленности и плохой видимости.

В темноте или в крошечном дыму велика вероятность задохнуться, упасть с лестницы, провалиться в образовавшееся отверстие или наступить на необесточенные оголенные провода.

Компания “Scott Safety” из Индианаполиса представила маску для пожарных Scott Sight, оснащенную целым комплексом приборов, позволяющих работать в условиях плохой видимости. В их число входит компактная камера с тепловизором, работающая в режиме реального времени, с дисплеем внутри маски.

Тепловизоры появились еще в 90-х годах и спасли жизни тысячам пожарных. Однако у них есть серьезные недостатки: они дороги, громоздки, неудобны при выполнении сложных манипуляций с противопожарным оборудованием. Новая маска лишена этих недостатков.

Встроенная камера ведет съемку с разрешением 150×120 и скоростью 9 кадров в секунду с трансляцией на внутренний дисплей. Как утверждает “Scott Safety”, камера имеет снабженный световыми фильтрами объектив с системой тепловой видеозаписи с максимально широким охватом. Заряда батареи хватает на 4 часа.

<http://www.techcult.ru/gadgets/3175-mask-a-s-teplovizorom>

ПРАВИЛА ДЛЯ АВТОРОВ!

Направляемые в журнал “ПОЖАРОВЗРЫВБЕЗОПАСНОСТЬ” 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. Методы расчета и экспериментальные данные, полученные автором, должны быть оформлены в соответствии с рекомендациями КОДАТА. Остальные численные данные, за исключением общеизвестных величин, следует снабжать ссылками на первоисточник. Научные статьи должны иметь практическую направленность.

Не допускается направление в редакцию работ, 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 электронному адресу (info@fire-smi.ru), а также в бумажном виде по почте (121352, Российская Федерация, г. Москва, а/я 43).

Статья должна быть ясно изложена, тщательно отредактирована и подписана всеми авторами. Основной текст статьи должен быть лаконичным и структурированным. Следует делить текст на традиционные для научной статьи разделы:

- введение (актуальность, состояние вопроса);
- цели и задачи;
- материалы и методы (методология);
- теория и расчеты;
- результаты и их обсуждение;
- заключение (выводы).

Редакция допускает и иную структуру, обусловленную спецификой конкретной статьи (например, аналитической, обзорной), при условии четкого выделения разделов.

2. 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 недопустимы транслитерации с русского языка, кроме непереводимых названий собственных имен, приборов и других объектов, имеющих собственные названия, а также непереводимый сленг, известный только русскоговорящим специалистам. Это также касается 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 Госдепартамента США, 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, индекс, страну, 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 ведомству, форму собственности, статус организации (например, “Учреждение Российской академии наук...”, “Федеральное государственное унитарное предприятие...”, “ФГОУ ВПО...” и т. п.), что 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 короткое 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 авторские резюме на английском языке в русскоязычном издании являются 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 (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 текста авторского резюме должен быть не менее 250–300 слов.

Требуется структура резюме, повторяющая структуру статьи и включающая введение, цели и задачи, методы, результаты, заключение (выводы). Однако предмет, тема, цель работы указываются в том случае, если они неясны из заглавия статьи. Метод или методологию проведения работы целесообразно описывать в том случае, если они отличаются новизной или представляют интерес с точки зрения данной работы.

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

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

Сведения, содержащиеся в заглавии статьи, не должны повторяться в тексте авторского резюме.

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

Сокращения и условные обозначения, кроме общепотребительных, следует применять в исключительных случаях или да-

вать их расшифровку и определение при первом употреблении в авторском резюме.

В авторское резюме не рекомендуется включать схемы, таблицы, иллюстрации, формулы, а также ссылки на публикации, приведенные в списке литературы к статье.

2.6. Ключевые слова на русском и английском языках (не менее 5 слов или словосочетаний). 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) и т. п.

2.7. Основной текст статьи должен быть набран через 1,5 интервала и предоставляться в формате Word. Формулы должны быть набраны в Microsoft Equation или MathType.

Цитируемый текст из других публикаций следует брать в кавычки. Если представленные в статье исследования выполнены авторами при финансовой поддержке Российского фонда фундаментальных исследований, Российского научного фонда, Министерства образования и науки Российской Федерации и др., то в конце статьи обязательно следует дать информацию об этом с указанием номера и названия гранта (научного проекта, госконтракта и т.п.).

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 представляются 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 напечатать PDF-файл из этой программы. Все иллюстрации должны иметь сквозную нумерацию. Чертежи и карты в качестве иллюстраций не приемлемы. 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.

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.

Список литературы должен содержать не менее 10 источников (не включая в это число нормативные документы, патенты и т. п.), в том числе не менее 3 иностранных. Выполнение данного тре-

бования 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 не должно быть более 30 % источников, автором либо соавтором которых является автор статьи.

Не следует включать в список литературы ГОСТы, ссылки на них должны быть даны непосредственно по тексту статьи.

Убедитесь, что указанная в списке литературы информация (Ф. И. О. автора, название книги или журнала, год издания, том, номер и количество (интервал) страниц) верна.

Неопубликованные результаты, проекты документов, личные сообщения и т. п. не следует указывать в списке литературы, но они могут быть упомянуты в тексте.

2.9. References (пристайные списки литературы на английском языке). Представление в References только транслитерированного (без перевода) описания недопустимо. Обращаем Ваше внимание, что перевод названия статей следует давать так, как он проходил при их публикации, а перевод названий журналов должен быть официально принятым. Произвольное сокращение названий источников цитирования приведет к невозможности идентифицировать ссылку в электронных базах данных.

При составлении References необходимо следовать схеме:

- авторы (транслитерация; для ее написания используйте сайт <http://fotosav.ru/services/transliteration.aspx>, обязательно включив в настройках справа сверху флажок “Американская (для визы США)”);
- транслитерация и перевод названия книги (статьи) на английский язык;
- перевод названия источника (журнала, сборника статей, материалов конференции и т. п.); при этом для журналов следует привести комбинацию транслитерации названия и его перевода (через косую черту);
- выходные данные;
- указание на язык материала в скобках.

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).

Примеры описаний в References можно найти на сайте издательства (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. Непринятые к публикации статьи автору не возвращаются. Просьба редакции о переработке материала не означает, что он принят к печати.

5. Статьи, присланные в редакцию не в полном объеме, к рассмотрению не принимаются.

SOLIDS EUROPEAN SERIES

SOLIDS

RUSSIA

6 – 7 июня 2017

ЦВК „Экспоцентр“, Москва

Станьте участником!

3-я конференция и
выставка по технологиям
и транспортировке
сыпучих материалов

www.solids-russia.ru

Organised by
EASYFAIRS
Visit the future

РЕКЛАМА