

6-2015

ПОЖ Издательство
НАУКА

ПОЖАРОВЗРЫВО-

БЕЗОПАСН **СТЬ**

НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКИЙ ЖУРНАЛ

ISSN 0869-7493

КОМПЛЕКСНАЯ БЕЗОПАСНОСТЬ

пожарная • промышленная • производственная • экологическая



ОПРЕДЕЛЕНИЕ СРЕДНЕЙ ТЕМПЕРАТУРЫ
ГАЗА НА АВАРИЙНОМ УЧАСТКЕ
МАГИСТРАЛЬНОГО ГАЗОПРОВОДА

Поддержка проекта: Уральский региональный центр МЧС России

STOPFIRE 2015

Дата проведения:
13 - 15 октября 2015 г.

**II Выставка технологий,
товаров и услуг
для пожарной безопасности**

**Международный выставочный центр
«Екатеринбург-ЭКСПО»**
Бульвар Экспо, 2

Приглашаем к участию!

РЕКЛАМА

Организатор:

 **СОЮЗПРОМЭКСПО**
(343) 272-32-35
<http://stopfire.souzipromexpo.ru/>

Соорганизаторы:

БИЗНЕС  ОБЪЕДИНЕНИЕ
ВЫСТАВОЧНЫХ
КОМПАНИЙ

Медиапартнеры:

ЮМ  **112** ЕДИНАЯ СЛУЖБА
СПАСЕНИЯ  

 **SOVA**
охранное предприятие

Генеральный
интернет партнер:


Генеральный
информационный партнер:


Генеральный
партнер проекта:
РУБЕЖ
Информационно-аналитический журнал

01.RU **TexСовет**

СОДЕРЖАНИЕ

CONTENTS

НОВОСТИ, КОНФЕРЕНЦИИ, ВЫСТАВКИ

Выставка MIPS 2015 признана специалистами событием года в сфере обеспечения безопасности.
Пресс-релиз по итогам выставки

5

ПРОЦЕССЫ ГОРЕНИЯ И ВЗРЫВА

АНТОНОВ Д. В., ВОЛКОВ Р. С., СТРИЖАК П. А.
Статистический анализ последствий столкновения капель воды при их движении через пламя в виде потока распыленной жидкости

7

ПОЖАРОВЗРЫВООПАСНОСТЬ ВЕЩЕСТВ И МАТЕРИАЛОВ

ПОКРОВСКАЯ Е. Н., ПОРТНОВ Ф. А., КОБЕЛЕВ А. А., БЕЛЬЦОВА Т. Г.
Влияние структуры поверхностного слоя, образующегося при термическом разложении древесины, на ее дымообразующую способность

КАЛАЧ А. В., СОРОКИНА Ю. Н., ЧЕРНИКОВА Т. В.
Прогнозирование пожароопасных свойств антрахиновых красителей с применением дескрипторов

16

23

ПОЖАРНАЯ ОПАСНОСТЬ ЭЛЕКТРОТЕХНИЧЕСКИХ ИЗДЕЛИЙ

НЕДОБИТКОВ А. И.
Экспертное исследование автомобильных латунных кабельных наконечников провода массы

29

ПОЖАРОВЗРЫВБЕЗОПАСНОСТЬ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ И ОБОРУДОВАНИЯ

КУПЦОВ А. И., АКБЕРОВ Р. Р., ГИМРАНОВ Ф. М.
Расчет длительности опорожнения технологического оборудования через свечи сброса

БЫКОВ А. И.
Определение средней температуры газа на аварийном участке магистрального газопровода

37

43

ПОЖАРНАЯ БЕЗОПАСНОСТЬ ЗДАНИЙ, СООРУЖЕНИЙ, ОБЪЕКТОВ

ОРЛОВ Г. Г., КОРОЛЬЧЕНКО Д. А., КОРОЛЬЧЕНКО А. Я.
Экономическая оценка эффективности применения предохранительных конструкций для обеспечения взрывоустойчивости зданий и сооружений

51

БЕЗОПАСНОСТЬ ЛЮДЕЙ ПРИ ПОЖАРАХ

БАРАНОВСКИЙ Н. В., КОРОБКИНА Д. В.
Численное исследование процессов теплового воздействия лесного пожара на кожные покровы человека

АЙБУЕВ З. С.-А., ИСАЕВИЧ И. И., МЕДЯНИК М. В.
Свободное движение людей в потоке и проблемы индивидуально-поточного моделирования

58

66

СРЕДСТВА И СПОСОБЫ ТУШЕНИЯ ПОЖАРОВ

ДЕВЯТКИН В. А., СЕРЕБРЕННИКОВ С. Ю., ЧЕРНОВ С. В.
Анализ эффективности автоматических аэрозольно-порошковых систем пожаротушения на крупных нефтегазовых объектах

74

ВОПРОС – ОТВЕТ

76

NEWS, CONFERENCES, EXHIBITIONS

MIPS 2015 is recognized by experts as the event of the year in the field of security.
Press-release following the results of an exhibition

COMBUSTION AND EXPLOSION PROCESSES

ANTONOV D. V., VOLKOV R. S., STRIZHAK P. A.
Statistical analysis of the effects of water droplets collision at their movement through the flame as a sprayed liquid stream

FIRE-AND-EXPLOSION HAZARD OF SUBSTANCES AND MATERIALS

POKROVSKAYA E. N., PORTNOV F. A., KOBELEV A. A., BELTSOVA T. G.
Influence of surface layer structure formed during thermal degradation of wood on smoke generation property

KALACH A. V., SOROKINA Yu. N., CHERNIKOVA T. V.
Forecasting of fire hazard properties of anthraquinone dyes using descriptors

FIRE HAZARD OF ELECTROTECHNICAL PRODUCTS

NEDOBITKOV A. I.
Expert research of automobile brass cable lug wire weight

FIRE-AND-EXPLOSION SAFETY OF TECHNOLOGICAL PROCESSES AND EQUIPMENT

KUPTSOV A. I., AKBEROV R. R., GIMRANOV F. M.
Calculation of duration of emptying the processing equipment through release stacks

BYKOV A. I.
Determination of the average gas temperature in the emergency section of the main pipeline

FIRE SAFETY OF BUILDINGS, STRUCTURES, OBJECTS

ORLOV G. G., KOROLCHENKO D. A., KOROLCHENKO A. Ya.
Economic efficiency of application of explosion-relief valves in order to ensure explosion stability of buildings and constructions

FIRE SAFETY OF PEOPLE

BARANOVSKIY N. V., KOROBKINA D. V.
Numerical research of processes of forest fire thermal influence on integuments of the person

AYBUEV Z. S.-A., ISAEVICH I. I., MEDYANIK M. V.
Free movement of people in a stream and problems of individual and line modeling

MEANS AND WAYS OF FIRE EXTINGUISHING

DEVYATKIN V. A., SEREBRENNIKOV S. Yu., CHERNOV S. V.
Analysis of the effectiveness of automatic aerosol-dry-chemical fire extinguishing systems on large oil and gas facilities

QUESTION – ANSWER

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 № ФС77-43615 от 18 января 2011 г.

Журнал включен в перечень ведущих рецензируемых научных журналов и изданий, рекомендованных ВАК России для публикации трудов соискателей ученых степеней, в Реферативный журнал и базы данных ВИНТИ РАН, в базу данных Российского индекса научного цитирования (РИНЦ). Сведения о журнале ежегодно публикуются в Международной справочной системе по периодическим и продолжающимся изданиям “Ulrich’s Periodicals Directory”. Переводные версии статей журнала входят в Международный реферативный журнал “Chemical Abstracts”. Перепечатка материалов журнала “Пожаровзрывобезопасность” 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 мнением авторов опубликованных материалов.



Председатель Редакционного совета:

Корольченко А. Я., д. т. н., профессор,
академик МАНЭБ (Россия)

Зам. председателя Редакционного совета:

Мольков В. В., д. т. н., профессор (Великобритания)

Редакционный совет:

Барбин Н. М., д. т. н., профессор (Россия)

Брушлинский Н. Н., д. т. н., профессор, академик РАЕН,
заслуженный деятель науки РФ (Россия)

Корольченко Д. А., к. т. н., академик МАНЭБ (Россия)

Мишуев А. В., д. т. н., профессор, академик РАЕН (Россия)

Пузач С. В., д. т. н., профессор, член-корреспондент
НАНПБ (Россия)

Ройтман В. М., д. т. н., профессор, академик НАНПБ
и ВАНКБ (Россия)

Серков Б. Б., д. т. н., профессор, действительный член
НАНПБ (Россия)

Тамразян А. Г., д. т. н., профессор,
действительный член ВАНКБ (Россия)

Топольский Н. Г., д. т. н., профессор, академик РАЕН
и НАНПБ, заслуженный деятель науки РФ (Россия)

Холщевников В. В., д. т. н., профессор, академик
и почетный член РАЕН, заслуженный работник высшей
школы РФ (Россия)

Шебеко Ю. Н., д. т. н., профессор, действительный член
НАНПБ (Россия)

Шилдс Т. Дж., профессор (Великобритания)

Редакция:

Главный редактор **Корольченко А. Я.**

Шеф-редактор **Соколова Н. Н.**

Редактор **Крылова Л. В.**

Учредитель —

ООО "Издательство "ПОЖНАУКА"

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

Адрес редакции:

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

Адрес для переписки:

121352, Россия, г. Москва, а/я 43.

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

www.fire-smi.ru, www.firepress.ru.

Подписано в печать 15.06.2015. Выход в свет 25.06.2015.

Формат 60x84 1/8. Тираж 2000 экз.

Бумага мелованная матовая. Печать офсетная.

Отпечатано в типографии ООО "КОДА"

(105082, Россия, г. Москва, Спартаковский пер., д. 2, стр.1).



Анализ последствий столкновения капель воды

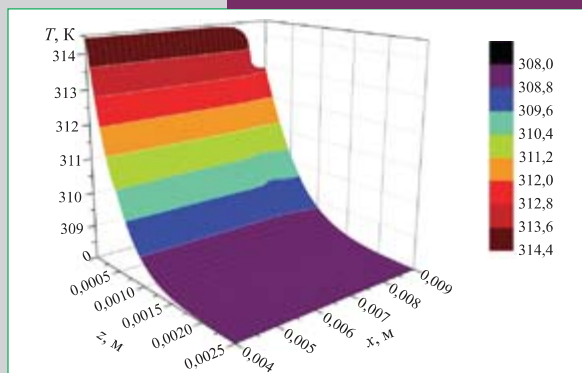
Стр. 5

Стр. 7



Исследование автомобильных кабельных наконечников

Стр. 29



Воздействие пожара на кожные покровы человека

Стр. 58

Стр. 74



Установки аэрозольно-порошкового пожаротушения

**Founder:**

"POZHNAUKA" Publishing House, Ltd.

Editorial Staff:

Editor-in-Chief **Korolchenko A. Ya.**

Editorial director **Sokolova N. N.**

Editor **Krylova L. V.**

Address of Editorial Staff:

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

Post office box 43,
Moscow, 121352, Russia.

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

E-mail: info@fire-smi,
mail@firepress

Website: www.fire-smi.ru,
www.firepress.ru

"Pozharovzryvobezopasnost" ("Fire and Explosion Safety") is included in List of periodical scientific and technical publication of the Russian Federation, what are recommended for publishing the main results of competitors for doctoral degree by VAK, in Abstracting Journal and VINITI Database RAS, is included in Russian Citation Index Database.

Information about the journal is annually published in "Ulrich's Periodicals Directory".

No part of this publication may be used or reproduced in any form or by any means without the prior permission of the Publishers.

Reproducing any part of this material a reference to the journal is obligatory.

Authors and advertisers account for contents of given papers and for publishing in the open press. Opinion of Editorial Staff not always coincides with Author's opinion

Signed for printing 15.06.2015

Date of publication 25.06.2015

Format is 60x84 1/8

Printing is 2000 copies

Chalk-overlay mat paper

Offset printing

Chairman of Editorial Board:

Korolchenko A. Ya.,

Doctor of Technical Sciences, Professor, Academician of International Academy of Ecology and Life Safety (Russia)

Deputy Chairman of Editorial Board:

Molkov V. V.,

Doctor of Technical Sciences, Professor (Great Britain)

Editorial Board:

Barbin N. M.,

Doctor of Technical Sciences, Professor (Russia)

Brushlinskiy N. N.,

Doctor of Technical Sciences, Professor, Academician of Russian Academy of Natural Sciences, Honoured Scientist of the Russian Federation (Russia)

Korolchenko D. A.,

Candidate of Technical Sciences, Academician of International Academy of Ecology and Life Safety (Russia)

Mishuev A. V.,

Doctor of Technical Sciences, Professor, Academician of Russian Academy of Natural Sciences (Russia)

Puzach S. V.,

Doctor of Technical Sciences, Professor, Corresponding Member of National Academy of Fire Science (Russia)

Roytman V. M.,

Doctor of Technical Sciences, Professor, Academician of National Academy of Fire Science, Academician of World Academy of Sciences of Complex Safety (Russia)

Serkov B. B.,

Doctor of Technical Sciences, Professor, Full Member of National Academy of Fire Science (Russia)

Tamrazyan A. G.,

Doctor of Technical Sciences, Professor, Full Member of World Academy of Sciences for Complex Safety (Russia)

Topolskiy N. G.,

Doctor of Technical Sciences, Professor, Academician of Russian Academy of Natural Sciences, Academician of National Academy of Fire Science, Honoured Scientist of the Russian Federation (Russia)

Kholshchevnikov V. V.,

Doctor of Technical Sciences, Professor, Academician and Honoured Member of Russian Academy of Natural Sciences, Honoured Higher Education Employee of the Russian Federation (Russia)

Shebeko Yu. N.,

Doctor of Technical Sciences, Professor, Full Member of National Academy of Fire Science (Russia)

Shields T. J.,

Professor (Great Britain)

ВЫСТАВКА MIPS 2015 ПРИЗНАНА СПЕЦИАЛИСТАМИ СОБЫТИЕМ ГОДА В СФЕРЕ ОБЕСПЕЧЕНИЯ БЕЗОПАСНОСТИ

Пресс-релиз по итогам выставки

С 13 по 16 апреля 2015 года в Москве с успехом состоялась 21-я Московская международная выставка MIPS 2015 — “Охрана, безопасность и противопожарная защита”. Организатором этого мероприятия выступила Группа компаний ITE, лидирующая на российском рынке выставочных услуг.

В церемонии торжественного открытия выставки приняли участие депутат Московской городской Думы, председатель Комиссии по безопасности Инна Святенко, начальник НИЦ “Охрана” Министерства внутренних дел Российской Федерации, полковник полиции Алексей Зайцев, начальник информационно-аналитического управления Федерального агентства по обустройству государственной границы Российской Федерации Дмитрий Рыжиков, старший инспектор по особо важным поручениям ГУООП МВД России Оксана Резниченко, заместитель начальника управления надзорной деятельности ГУ МЧС России по городу Москве Владимир Лохматов и другие почетные гости.

Открывая выставку, депутат Московской городской Думы Инна Святенко отметила, что из года в год выставка меняется к лучшему, в частности увеличивается количество участников, особенно российских производителей, что крайне важно для сферы безопасности. Она выразила уверенность, что выставка 2015 года даст большое количество положительных результатов, станет площадкой для многочисленных контактов и взаимодействия между различными структурами, направленными на улучшения в сфере безопасности.

В этом году площадь выставки превысила 11 500 м². Выставку посетили 16 922 специалиста отрасли из 79 регионов России и 47 зарубежных стран. Количество участников составило 426 компаний из 22 стран, в том числе из Китая и Тайваня.

Компании — участники выставки представили оборудование нового поколения, разработанное на основе передовых технологий: пульта, адресные и пожарные извещатели, биометрические системы контроля доступа, беспроводные системы сигнализации, системы видеонаблюдения и многое другое.

“Выставка MIPS 2015, безусловно, стала событием года, что особенно удивительно в реалиях стагнации экономики. Количество и, самое главное, уровень представления фирмами своих стендов и оборудования по сравнению с предыдущими годами заметно выросли. Особенно сильное впечатление произвел павильон с китайскими предприятиями: очевидно российско-китайское совместное движение навстречу друг другу”, — отметил заместитель директора музея “Государственный Эрмитаж”, лауреат премии Правительства РФ в области науки и техники Алексей Богданов, выступивший модератором конференции “Безопасность музеев”.

Одним из традиционных событий MIPS стал конкурс технических решений “Лучший инновационный продукт”, зарекомендовавший себя как один из инструментов продвижения новейших достижений в индустрии безопасности. Победители конкурса были определены специальной комиссией в шести номинациях: “Охранная сигнализация”, “Системы управления доступом”, “Системы охранного телевидения”, “Интегрированные системы безопасности”, “Информационный продукт”, “Пожарная сигнализация и безопасность”.

Обладателями золотых медалей стали ЗАО “Аргус-Спектр”, ООО “НТКФ “Си-Норд”, MOBOTIX AG, Western Digital, Производственная компания “Сибирский Проект”, ООО “Центр Ядерное приборостроение”. Лучшим докладчиком был признан Игорь Саутин (“ООО “КБ “Метроспецтехника”).

Партнеры и спонсоры выставки

- Генеральный партнер выставки — BEWARD.
- Партнер выставки — DAHUA.
- Спонсор зоны регистрации посетителей — CAME RUS.
- Партнер электронной регистрации — ЭКСКОН.
- Спонсор входной зоны — BAS-IP.



Московская
международная
выставка “Охрана,
безопасность
и противопожарная
защита”



www.mips.ru

Деловая программа

В рамках деловой программы выставки MIPS успешно прошли специализированные конференции по наиболее актуальным вопросам безопасности.

13 апреля состоялась конференция “Безопасность складских комплексов и логистических терминалов”. Участники конференции смогли обменяться мнениями, опытом и знаниями по предупреждению внутренних и внешних угроз в отношении складских комплексов и логистических терминалов. Участие в ней приняли более 160 специалистов — представителей логистических операторов, предприятий торговли и производственных предприятий, которые имеют собственные или арендованные складские помещения. Спонсором мероприятия выступила компания Nedap Security Management.

Конференция “Облачные технологии в мониторинге и безопасности” состоялась 14 апреля. В ходе ее работы участники обсудили мировые тенденции развития облачных технологий и их влияние на деятельность российских компаний в сфере безопасности, а также узнали о возможностях и преимуществах, которые открывают перед ними облачные технологии. Участниками конференции стали 180 специалистов.

В этот же день, 14 апреля, состоялась конференция “Безопасность музеев”. Мероприятие прошло при поддержке Международного совета музеев (ИКОМ России). Модератором выступил заместитель директора по эксплуатации музея “Государственный Эрмитаж” Алексей Богданов. Делясь впечатлениями об участии в конференции, он подчеркнул, что “деловая программа выставки охватывала широкий круг актуальных проблем и была проведена на солидном европейском уровне”.

Основное внимание конференции было уделено проблемам совершенствования нормативных документов по пожарной безопасности объектов культуры. Участники мероприятия узнали об опыте Государственного Эрмитажа в сфере пожарной безопасности, об использовании комплексных интегрированных систем безопасности в музейной практике, а также смогли ознакомиться с современными решениями по противопожарной защите музейных объектов, видеонаблюдению и охране экспонатов на основе радиочастотной идентификации.

15 апреля 2015 года состоялась конференция “Актуальные проблемы системы обеспечения пожарной безопасности в Российской Федерации”.

Участники конференции обсудили изменения в области нормативного регулирования обеспечения пожарной безопасности в России, требования к системам передачи извещений о пожаре (ГОСТ), влияние экономического кризиса на импорт товаров на рынке пожарной безопасности и другие вопросы. Конференция привлекла внимание 200 специалистов.

Спонсором конференции выступила компания “Аргус-Спектр”, партнером мероприятия — Федеральная палата пожарно-спасательной отрасли и обеспечения безопасности.

Всего в работе мероприятий деловой программы приняли участие более 600 делегатов.

Выставка MIPS – Securika в 2016 году

В 2016 году выставку MIPS ожидают перемены. Мероприятие будет проходить под новым фирменным знаком и названием MIPS — Securika. Эти изменения являются частью проекта по ребрендингу, который реализует организатор выставки — Группа компаний ITE в России. В рамках данного проекта организуются четыре выставки технических средств охраны и оборудования для обеспечения безопасности и противопожарной защиты, которые будут проходить в Москве, Санкт-Петербурге, Новосибирске и Краснодаре под единым брендом Securika.

Новый запоминающийся логотип, понятное и близкое отраслевому сообществу название позволят повысить узнаваемость бренда и будут содействовать более эффективному продвижению портфеля выставок тематики “безопасность” среди целевой аудитории посетителей — представителей оптовых и розничных торговых компаний, специалистов по установке и инженеров по эксплуатации технических средств охраны и оборудования для обеспечения безопасности и противопожарной защиты.

Дата проведения выставки MIPS – Securika в 2016 году: 14–17 марта.

Место проведения: ЦВК “Экспоцентр” (метро “Выставочная”).



Организатор:
Группа компаний ITE

Пресс-служба ITE:

e-mail: pr@ite-expo.ru
Тел.: +7 (495) 935-73-50
Факс: +7 (495) 935-73-51

Д. В. АНТОНОВ, студент Энергетического института Национального исследовательского Томского политехнического университета (Россия, 634050, г. Томск, просп. Ленина, 30; e-mail: 1aadsdfn@gmail.com)

Р. С. ВОЛКОВ, младший научный сотрудник кафедры автоматизации теплоэнергетических процессов, Энергетический институт Национального исследовательского Томского политехнического университета (Россия, 634050, г. Томск, просп. Ленина, 30; e-mail: romanvolkov@tpu.ru)

П. А. СТРИЖАК, д-р физ.-мат. наук, профессор кафедры автоматизации теплоэнергетических процессов, Энергетический институт Национального исследовательского Томского политехнического университета (Россия, 634050, г. Томск, просп. Ленина, 30; e-mail: pavelspa@tpu.ru)

УДК 536.4

СТАТИСТИЧЕСКИЙ АНАЛИЗ ПОСЛЕДСТВИЙ СТОЛКНОВЕНИЯ КАПЕЛЬ ВОДЫ ПРИ ИХ ДВИЖЕНИИ ЧЕРЕЗ ПЛАМЯ В ВИДЕ ПОТОКА РАСПЫЛЕННОЙ ЖИДКОСТИ

Представлены результаты статистического анализа последствий столкновения капель типичной тушащей жидкости (воды) при их движении через пламя, выполненного с использованием панорамных оптических методов и кросскорреляционного видеокomплекса. Для генерации пламени в эксперименте использовано специализированное горелочное устройство, заполненное жидким топливом с хорошо изученными свойствами — керосином. Показано, что в экспериментах размеры (диаметры) капель варьировались от 0,1 до 0,5 мм, а скорости их движения — от 0,5 до 12 м/с. Выделено несколько типичных результатов столкновения двух капель с их коагуляцией, дроблением или разлетом в пламени. Определено влияние скоростей движения, размеров и траекторий перемещения капель на результаты столкновения.

Ключевые слова: пламя; высокотемпературные газы; распыленная вода; капли; столкновение; коагуляция; дробление.

Введение

В соответствии с действующими во многих государствах программами ресурсоэффективности практически в каждой отрасли промышленности и сфере безопасности (в частности, пожарной) особое внимание уделяется минимизации (или оптимизации) расходования ресурсов. Многие специализированные системы пожаротушения (“водяной туман” [1, 2], водяная завеса [3–5], тонкораспыленная вода [6–10] и др.), на первый взгляд, обеспечивают минимизацию расхода тушащих жидкостных составов. Однако в реальной практике пожаротушения довольно сложно оценить необходимый для локализации или полной ликвидации пожаров объем тушащей жидкости [11–13]. Как следствие, расход таких жидкостей довольно значителен при ликвидации практически любых пожаров. Главными факторами, осложняющими такую оценку, являются существенно нестационарные процессы тепломассопереноса и гидродинамики в системе *жидкость – пламя*.

Выполненные в последние годы теоретические [10, 14, 15] и экспериментальные [16–19] исследо-

вания позволили определить массу жидкости, испаряющейся в зоне пламени в условиях, приближенных к реальным пожарам. В [10, 14, 15] определены концентрации газов и температуры, достигаемые в следе каплей в результате интенсивного испарения, но при постановке задач приняты достаточно условные схемы движения капельных потоков воды через пламя. Эксперименты [16–19] показали, что при движении через пламя (высокотемпературные продукты сгорания) достаточно типичны процессы коагуляции, столкновения и дробления капель. Эти процессы приводят к существенному изменению структуры капельных потоков в пламени [16–19], поэтому представляет интерес экспериментальное изучение процессов взаимодействия двух капель в типичных пламенах для условий работы разных, наиболее широко используемых распылительных систем пожаротушения. Опыты [16–19] показали, что такие процессы можно экспериментально исследовать с высокой достоверностью лишь с применением современных “бесконтактных” панорамных оптических методов

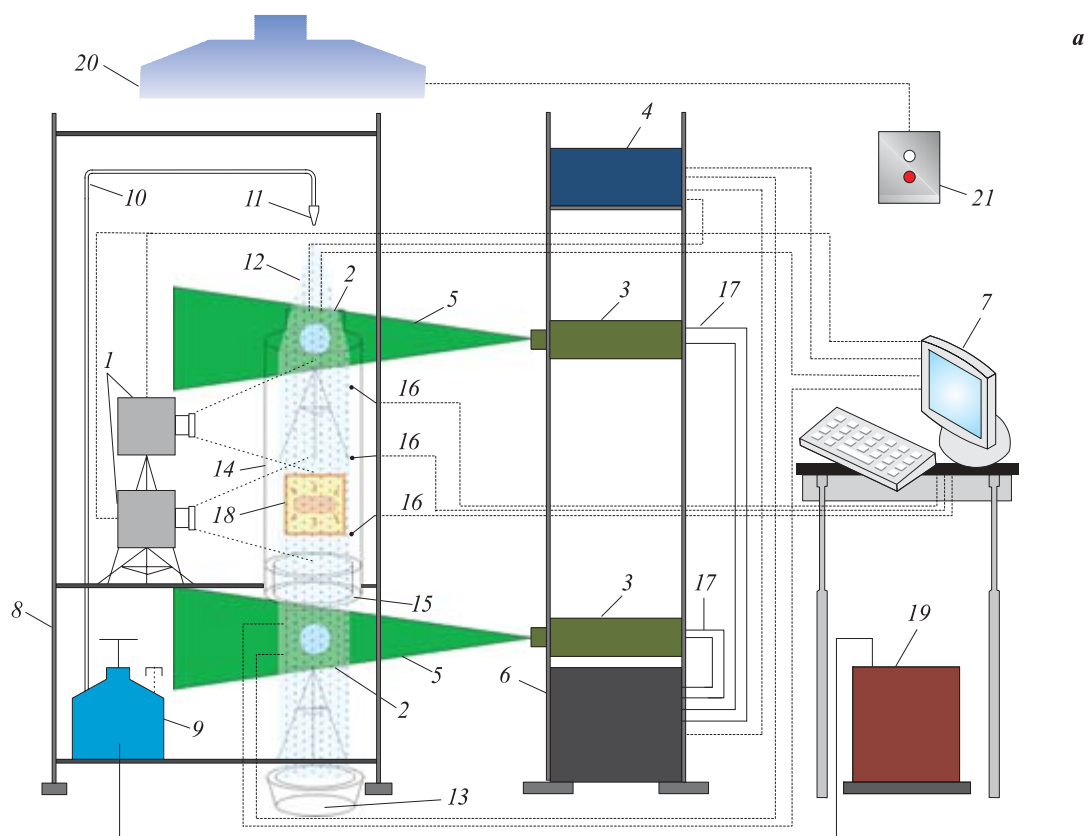


Рис. 1. Схема (*a*) и внешний вид (*б*) экспериментальной установки: 1 — высокоскоростная видеокамера; 2 — кросскорреляционная камера; 3 — двойной твердотельный импульсный лазер; 4 — синхронизатор ПК, кросскорреляционной камеры и лазера; 5 — световой “нож”; 6 — генератор лазерного излучения; 7 — ПК; 8 — штатив; 9 — емкость с водой; 10 — канал подачи воды; 11 — распылитель; 12 — распыленная вода; 13 — уловитель; 14 — цилиндр из жаростойкого светопрозрачного материала; 15 — полый цилиндр с горючей жидкостью во внутреннем пространстве; 16 — термопары; 17 — канал движения охлаждающей жидкости лазера; 18 — прожектор; 19 — нагревательная установка; 20 — нагнетательная система; 21 — пульт включения/отключения нагнетательной системы

“трассерной” визуализации, скоростных видеокамер и кросскорреляционных комплексов.

Цель настоящей работы — анализ последствий столкновений двух капель воды при их движении через пламя на базе результатов экспериментов с использованием панорамных оптических методов “трассерной” визуализации газо- и парожидкостных потоков.

Методика экспериментальных исследований

При проведении исследований использовался экспериментальный стенд (рис. 1), аналогичный по основным элементам установкам, применяемым в опытах [16–19]. В отличие от экспериментов [16–19], наряду с кросскорреляционным видеокомплексом, применялись две высокоскоростные (10^5 кадров в секунду) камеры со специализированным программным обеспечением “Tema Automotive”.

Аналогично экспериментам [16–19] регистрировались изображения капель воды в процессе их движения через высокотемпературные (около 1100 К) газы — продукты сгорания керосина в цилиндре из жаростойкого светопрозрачного стекла 14 (высотой 1 м, с внутренним и внешним диаметрами соответственно 0,2 и 0,206 м). Температура газов T_g в пламенной зоне горения измерялась тремя хромель-алюмелевыми термопарами 16 (с диапазоном измеряемых температур 273–1373 К и систематической погрешностью ± 3 К), которые устанавливались в цилиндре 14 на разной высоте (0,15; 0,50 и 0,85 м). Начальная температура вводимых в газовую среду капель воды T_w поддерживалась около 300 К с помощью системы нагревательных камер и хромель-копелевой термопары (с диапазоном измеряемых температур 273–473 К и систематической погрешностью $\pm 1,5$ К). Максимальные случайные погрешности измерения T_g достигали 20 К, а T_w — не более 3 К.

Размеры каждого видеокadra в области высокотемпературных газов выбирались в соответствии с характерной длиной регистрируемых участков траектории движения двух исследуемых сталкивающихся капель. По всей длине цилиндрического канала выполнялась видеосъемка. В результате обработки видеogramм отобрано более 1000 кадров с характерными столкновениями двух капель различных размеров при разных скоростях их движения и углах пересечения траекторий перемещения.

Начальные размеры (радиусы) капель в потоке распыленной жидкости изменялись от 0,05 до 0,25 мм. Относительная объемная концентрация капель жидкости в 1 м^3 газа γ_m поддерживалась в диапазоне 0,001–0,0012 м^3 . Выбор диапазонов изме-

нения радиусов капель r_m и их концентрации γ_m обусловлен специфическими ограничениями панорамных оптических методов “трассерной” визуализации PIV и SP [20–22], применяемых при обработке видеogramм экспериментов.

Скорости движения продуктов сгорания в области видеорегистрации u_g регулировались с использованием нагнетательной системы и составляли во всех экспериментах около 1,5 м/с. Скорости движения капель в потоке высокотемпературных газов u_m изменялись в диапазоне от 0,5 до 5 м/с.

Для измерения скоростей движения капель воды u_m и газов u_g применялся панорамный оптический метод PIV [20–22]. Скорости перемещения газов (продуктов сгорания) в экспериментах определялись до вдува капель распыленной жидкости. “Трассирующие” частицы нанопорошка диоксида титана вводились в поток газов в нижней части регистрационного канала 14. Аналогично методикам [20–22] регистрировались мгновенные распределения скоростей “трассеров” в потоке газов между вспышками лазера. Скорости движения капель воды определялись по скоростям перемещения “трассеров”, входящих в их объем, аналогично [20–22], а также с использованием программного обеспечения “Tema Automotive” и высокоскоростной видеорегистрации. Дополнительное применение высокоскоростной видеорегистрации позволило снизить систематические погрешности измерения скоростей u_m сталкивающихся капель до 0,01 м/с.

Размеры (радиусы) капель r_m определялись с использованием панорамного метода SP [20–22]. За потоком распыленной жидкости (относительно камеры) располагался диффузный (стробоскопический) источник света с равномерным пространственным распределением интенсивности. Плоскость фокусировки объектива камеры находилась в непосредственной близости к центру потока распыленной жидкости для получения наибольшей четкости теневой фотографии капель. Максимальные систематические погрешности измерения r_m не превышали 10^{-5} м. Максимальные случайные погрешности определения рассматриваемых параметров составляли: для r_m — 2,1 %, u_g и u_m — 3,4 %. Для определения случайных погрешностей измерений использовались методики [23–25].

При обработке видеogramм экспериментов определялись также углы пересечения траекторий движения капель в момент их столкновения α (рис. 2) с использованием программного обеспечения “Tema Automotive” и параметрической сетки на видеogramмах. В проведенных экспериментах значения α изменялись в диапазоне 20–160°.

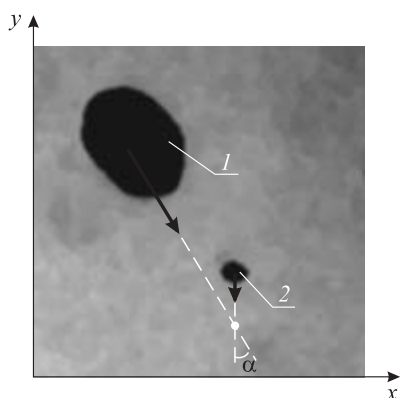


Рис. 2. Видеogramма с изображением капель воды перед столкновением с обозначением направлений их движения и угла столкновения α (1, 2 — первая и вторая капли)

Результаты и их обсуждение

На рис. 3 приведены типичные, следующие один за другим с указанной задержкой видеокadры с изо-

бражениями каплей воды в пламенной зоне горения при реализации трех выявленных вариантов последствий столкновений: 1 — коагуляция (слияние) (критерий P_1); 2 — разлет (образование двух капель с характерными размерами, близкими к начальным) (критерий P_2); 3 — дробление (образование более трех капель существенно меньшего размера относительно начального) (критерий P_3).

Анализ более 1000 кадров видеogramм проведенных экспериментов позволил определить частоту реализации каждого из трех последствий столкновений. При численной обработке результатов экспериментов использованы параметры:

$$P_1 = N_1 / (N_1 + N_2 + N_3); \quad P_2 = N_2 / (N_1 + N_2 + N_3);$$

$$P_3 = N_3 / (N_1 + N_2 + N_3),$$

где N_1, N_2, N_3 — число столкновений, в результате которых реализуются соответственно первый, второй и третий варианты последствий.

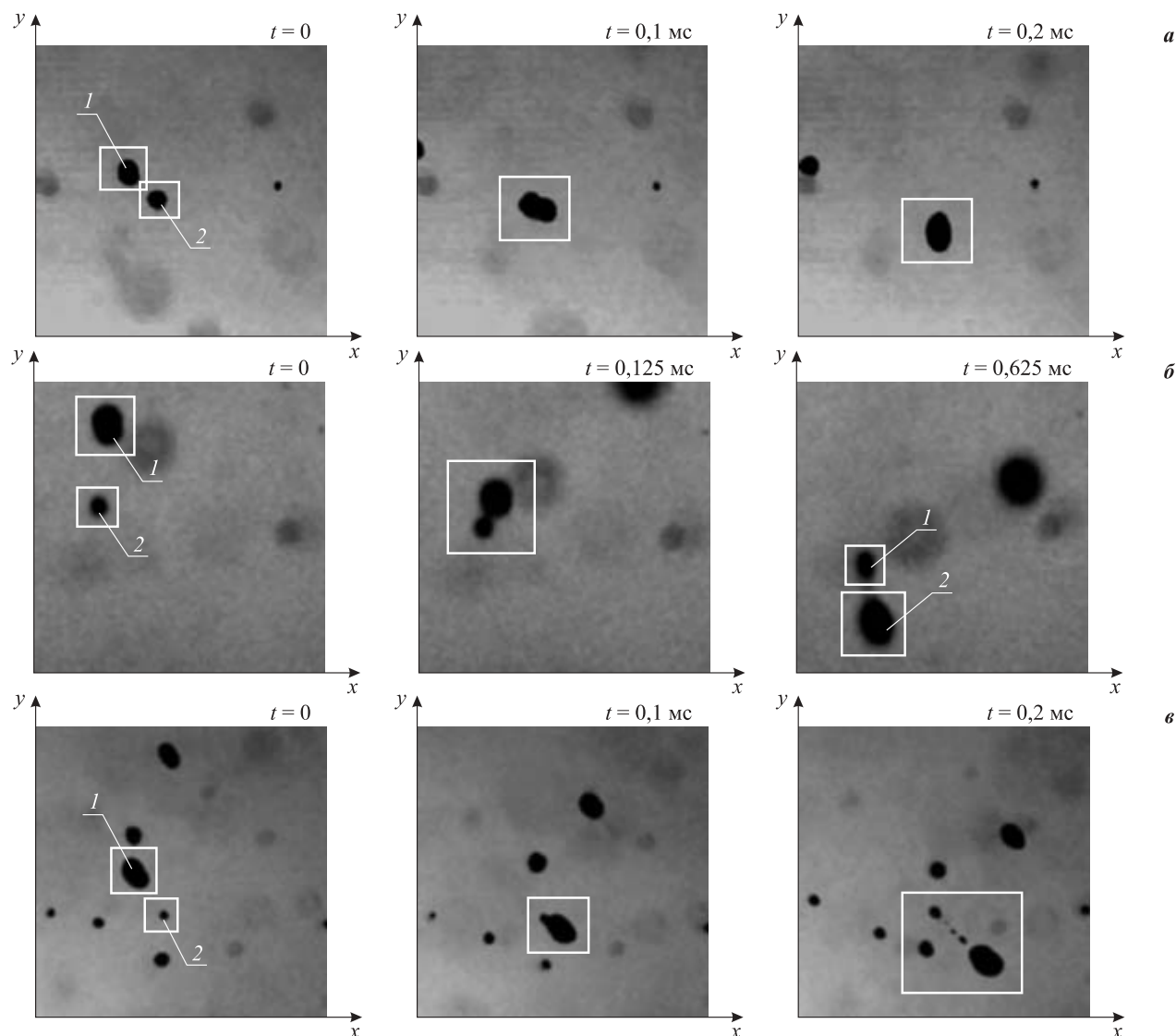


Рис. 3. Видеogramмы при реализации трех последствий столкновения двух капель воды: а — коагуляция, б — разлет, в — дробление; 1, 2 — первая и вторая капли

На рис. 4 представлены типичные значения критериев P_1 , P_2 и P_3 при изменении скоростей движения сталкивающихся капель. Следует отметить, что на рис. 4 приведены результаты выборки при изменении размеров капель в довольно широком диапазоне — от 0,075 до 0,25 мм. Рассмотрены 300 столкновений (по 50 столкновений при идентичных начальных параметрах исследуемого процесса). Скорость второй из двух сталкивающихся капель выбиралась довольно малой относительно скорости первой ($u_{m2} < u_{m1}$). Рассмотрены следующие диапазоны: $u_{m2} = 1 \div 3$ м/с, $u_{m1} = 1 \div 12$ м/с.

Из рис. 4 хорошо видно, что при малых и сопоставимых скоростях движения капель частота последствий их столкновения с последующей коагуляцией очень высока (соответствует максимальной, если анализировать число повторений результатов столкновений). Это обусловлено, скорее всего, тем, что силы вязкости и поверхностного натяжения превышают силы инерции при таких скоростях движения капель. При росте разности скоростей сталкивающихся капель частота последствий столкновений с разлетом (P_2) и дроблением (P_3) существенно увеличивается (см. рис. 4). При этом для максимальных ($u_{m1} \approx 12$ м/с) и минимальных ($u_{m2} \approx 1$ м/с) скоростей в проведенных экспериментах частота дробления (P_3) превышает частоту разлета (P_2).

Для определения влияния разности характерных размеров сталкивающихся капель на результат их взаимодействия выполнена выборка из представленных на рис. 4 частот столкновений с существенно отличающимися и сопоставимыми значениями r_m . Так, на рис. 5, а приведены значения P_1 , P_2 и P_3 при сопоставимых размерах капель $r_{m1} \approx r_{m2} \approx 0,15$ мм. Из графиков видно, что при сопоставимых размерах капель рост разности скоростей их движения

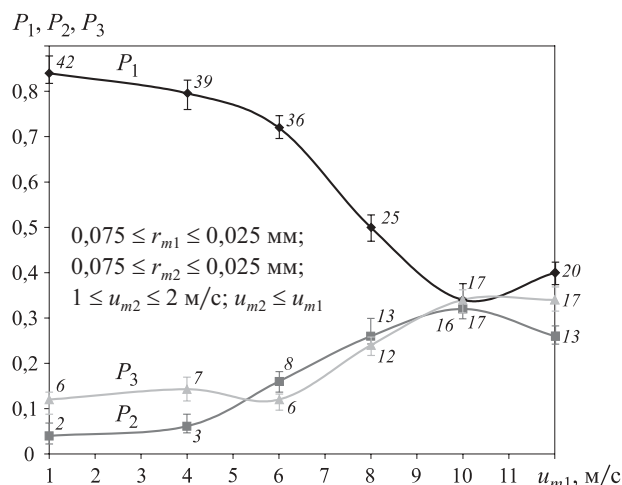


Рис. 4. Статистика происхождения каждого из трех последствий столкновений двух капель при изменении скорости перемещения одной из них: P_1 — коагуляция; P_2 — разлет; P_3 — дробление (значения у точек — число столкновений)

приводит к увеличению частоты разлета и уменьшению числа столкновений с коагуляцией, а частота дробления при этом минимальна. Этот результат, скорее всего, обусловлен тем, что при сопоставимых размерах и малых скоростях движения капель их импульсы (характеризующие механическое движение тел и определяемые их скоростями перемещения и массами) практически идентичны. Как следствие, силы инерции при столкновении минимальны, а силы поверхностного натяжения и вязкости существенны, что приводит к доминированию процесса коагуляции. С ростом скорости движения одной из капель при равных значениях r_m площади их поверхностей остаются сопоставимыми, но импульсы различаются, поэтому капли после слияния разлетаются с сохранением характерных площадей поверхностей, но с разными скоростями.

При кратном различии и скоростей перемещения, и размеров капель частота последствий их столкновений с реализацией процесса дробления существенно возрастает (рис. 5, б). В этом случае импульсы сталкивающихся капелькратно различаются вследствие разных значений r_m и u_m . Видеограммы экспериментов показали, что либо большие капли “поглощают” малые и происходит коагуляция, либо большие капли, движущиеся с высокой скоростью, сталкиваются с малыми и происходит дробление (см. рис. 5, б). Численный анализ результатов экспериментов позволил сделать вывод о том, что при высоких ско-

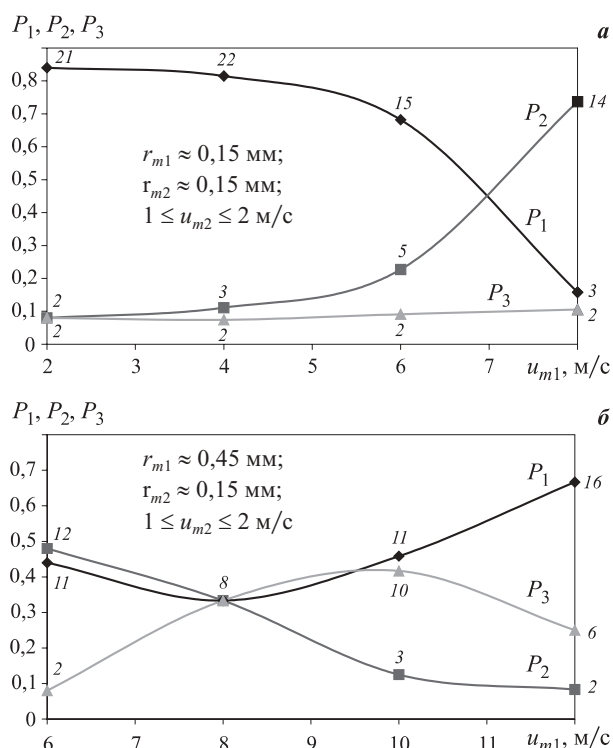


Рис. 5. Выборка статистики столкновений двух капель с одинаковыми (а) икратно отличающимися (б) размерами: P_1 — коагуляция; P_2 — разлет; P_3 — дробление

ростях движения и больших размерах капель для их дробления достаточно взаимодействие даже с очень малыми и почти “покоящимися” ($u_{m2} \ll u_{m1}$) каплями.

На первый взгляд, помимо размеров r_m и скоростей u_m , существенно на результат столкновения капель может влиять угол пересечения траекторий их движения α . На рис. 4 и 5 приведены частоты реализации трех установленных вариантов столкновений при изменении угла α в широком диапазоне — от 20 до 160°. Вследствие монотонных зависимостей для P_1 , P_2 и P_3 можно сделать вывод о довольно умеренном влиянии угла α на результат столкновения. Этот достаточно неочевидный результат статистического анализа развивает современные представления теории гидродинамики и теплопереноса для газочапельных систем [26]. Эксперименты показали, что влияние параметра α на результат столкновения может усиливаться при повышении скоростей перемещения обеих капель относительно максимальных (10 м/с).

Выявленные в экспериментах последствия столкновений капель свидетельствуют о довольно сложном характере реализации этих процессов в пламенной зоне горения. Учитывая высокие значения P_1 (в широком диапазоне изменения u_m и r_m), можно сделать вывод о правомерности заключений [16–19] о сложности механизма коагуляции капель тушащих жидкостных составов в пламени (по результатам анализа видеogramм экспериментов [18, 19] выделены три режима коагуляции). В то же время зависимости, установленные для P_1 , позволили определить условия, при которых частота реализации процесса коагуляции минимальна. Это важно для правильного выбора начальных параметров распыления капель воды в зоне пламени с целью эффек-

тивного использования всей массы тушащей жидкости. В соответствии с [10, 14, 15] под эффективно задействованной понимается масса воды, полностью испарившейся в зоне пламени, в результате чего происходит снижение температуры в зоне горения и вытеснение из нее водяными парами продуктов сгорания и окислителя. Для пламен разной высоты определены [16–19] диапазоны оптимальных размеров капель, их концентрации в потоке и характерные скорости движения через пламя, при которых возможно практически полное испарение воды. С учетом установленных в настоящей работе последствий столкновений возможно прогнозирование изменения начальных параметров u_m и r_m и концентрации капель в потоке для обеспечения требуемой полноты испарения капель.

Заключение

Установленные в экспериментах варианты последствий столкновения двух капель воды в высокотемпературном газовом потоке позволяют прогнозировать условия движения капель распыленных тушащих жидкостей через типичные пламена. На основе этих вариантов можно выбирать параметры подачи жидкости в зону пламени и расположения распылителей (относительно друг друга), при которых будет обеспечиваться требуемое измельчение капель потока или их укрупнение. Это, в свою очередь, позволит формировать полидисперсные капельные потоки для минимизации расхода массы тушащей жидкости при сохранении ее огнетушащей способности.

Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда (проект 14-39-00003).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Саламов А. А. Современная система пожаротушения “водяной туман” высокого давления // Энергетик. — 2012. — № 3. — С. 16–18.
2. Терпигорьев В. С. Водяной туман как средство защиты объектов культуры // Алгоритм безопасности. — 2006. — № 5. — С. 18–20.
3. Виноградов А. Г. Учет спектрального состава теплового излучения при расчете коэффициента пропускания капли воды // Пожаровзрывобезопасность. — 2013. — Т. 22, № 9. — С. 64–73.
4. Виноградов А. Г. Методика расчета экранирующих свойств водяных завес // Пожаровзрывобезопасность. — 2014. — Т. 23, № 1. — С. 45–56.
5. Виноградов А. Г. Применение теории затопленных струй к расчету параметров водяных завес // Пожаровзрывобезопасность. — 2014. — Т. 23, № 5. — С. 76–87.
6. Karpov A. I., Novozhilov V. B., Galat A. A., Bulgakov V. K. Numerical modeling of the effect of fine water mist on the small scale flame spreading over solid combustibles // Fire Safety Science : Proceeding of Eight International Symposium. — 2005. — Vol. 27. — P. 753–764.
7. Корольченко Д. А., Громоной В. Ю., Ворогушин О. О. Применение тонкораспыленной воды для тушения пожаров в высотных зданиях // Пожаровзрывобезопасность. — 2011. — Т. 20, № 9. — С. 54–57.

8. Соколов В. В., Тугов А. Н., Гришин В. В., Камышев В. Н. Автоматическое водяное пожаротушение с применением тонкораспыленной воды на электростанциях // Энергетик. — 2008. — № 6. — С. 37–38.
9. Сегаль М. Д. Использование тонкораспыленной воды для повышения противопожарной защиты кабельных сооружений АЭС // Проблемы безопасности и чрезвычайных ситуаций. — 2011. — № 4. — С. 61–64.
10. Волков Р. С., Кузнецов Г. В., Стрижак П. А. Численная оценка оптимальных размеров капель воды в условиях ее распыления средствами пожаротушения в помещениях // Пожаровзрывобезопасность. — 2012. — Т. 21, № 5. — С. 74–78.
11. Щетинский Е. А. Тушение лесных пожаров. — М. : ВНИИЛМ, 2002. — 328 с.
12. Баратов А. Н. Горение — Пожар — Взрыв — Безопасность. — М. : ФГУП ВНИИПО МЧС России, 2003. — 364 с.
13. Горшков В. И. Тушение пламени горючих жидкостей. — М. : Пожнаука, 2007. — 268 с.
14. Высокоморная О. В., Кузнецов Г. В., Стрижак П. А. Тепломассоперенос при движении капель воды в высокотемпературной газовой среде // Инженерно-физический журнал. — 2013. — Т. 86, № 1. — С. 59–65.
15. Жданова А. О., Кузнецов Г. В., Стрижак П. А. Влияние распределения капель воды в “водяном снаряде” на температуру в его следе // Пожаровзрывобезопасность. — 2013. — Т. 22, № 2. — С. 9–17.
16. Волков Р. С., Кузнецов Г. В., Стрижак П. А. О некоторых физических закономерностях испарения распыленной воды при движении через высокотемпературные продукты сгорания // Известия Томского политехнического университета. — 2013. — Т. 323, № 2. — С. 201–207.
17. Волков Р. С., Кузнецов Г. В., Стрижак П. А. Экспериментальное исследование влияния начальной температуры распыленной воды на интенсивность ее испарения при движении через пламя // Пожаровзрывобезопасность. — 2014. — Т. 23, № 3. — С. 12–21.
18. Волков Р. С., Кузнецов Г. В., Стрижак П. А. Влияние начальных параметров распыленной воды на характеристики ее движения через встречный поток высокотемпературных газов // Журнал технической физики. — 2014. — Т. 84, № 7. — С. 15–23.
19. Волков Р. С., Кузнецов Г. В., Стрижак П. А. Особенности испарения двух капель воды, движущихся последовательно через высокотемпературные продукты сгорания // Теплофизика и аэромеханика. — 2014. — Т. 21, № 2. — С. 269–272.
20. Keane R. D., Adrian R. J. Theory of cross-correlation analysis of PIV images // Applied Scientific Research. — 1992. — Vol. 49, Issue 3. — P. 191–215. doi: 10.1007/bf00384623.
21. Westerweel J. Fundamentals of digital particle image velocimetry // Measurement Science and Technology. — 1997. — Vol. 8, No. 12. — P. 1379–1392. doi: 10.1088/0957-0233/8/12/002.
22. Foucaut J. M., Stanislas M. Some considerations on the accuracy and frequency response of some derivative filters applied to particle image velocimetry vector fields // Measurement Science and Technology. — 2002. — Vol. 13, No. 7. — P. 1058–1071. doi: 10.1088/0957-0233/13/7/313.
23. Шенк Х. Теория инженерного эксперимента. — М. : Мир, 1972. — 381 с.
24. Зайдель А. Н. Элементарные оценки ошибок измерений / Академия наук СССР. — 3-е изд., испр. и доп. — Л. : Наука, 1968. — 96 с.
25. Полежаев Ю. В., Юрьевич Ф. Б. Тепловая защита. — М. : Энергия, 1976. — 391 с.
26. Терехов В. И., Пахомов М. А. Тепломассоперенос и гидродинамика в газокapельных потоках. — Новосибирск : Изд-во НГТУ, 2009. — 284 с.

Материал поступил в редакцию 3 февраля 2015 г.

English

STATISTICAL ANALYSIS OF THE EFFECTS OF WATER DROPLETS COLLISION AT THEIR MOVEMENT THROUGH THE FLAME AS A SPRAYED LIQUID STREAM

ANTONOV D. V., Student of Institute of Power Engineering, National Research Tomsk Polytechnic University (Lenina Avenue, 30, Tomsk, 634050, Russian Federation; e-mail address: 1aadsdfn@gmail.com)

VOLKOV R. S., Low Researcher of Heat and Power Process Automation Department, Institute of Power Engineering, National Research Tomsk Polytechnic University (Lenina Avenue, 30, Tomsk, 634050, Russian Federation; e-mail address: romanvolkov@tpu.ru)

STRIZHAK P. A., Doctor of Physical and Mathematical Sciences, Professor of Heat and Power Process Automation Department, Institute of Power Engineering, National Research Tomsk Polytechnic University (Lenina Avenue, 30, Tomsk, 634050, Russian Federation; e-mail address: pavelspa@tpu.ru)

ABSTRACT

The scheme, technique and results of experiments on statistical analysis of the effects of water droplets collision at their movement through the flame as a sprayed liquid stream are provided in this work. For receiving results of experimental research the modern high-speed video registration means, a cross-correlation video complex, and also the advanced methods and algorithms of information processing were used. It is established that errors of measurement of the water droplet sizes were no more than 2,1 %, speeds of gases and droplets — 3,4 %.

Several characteristic modes of collision of droplets at the movement through a flame are revealed. The reasons of emergence of the revealed modes are established and the corresponding facsimiles are provided. Probabilities of approach of each collision modes (coagulation, crushing and scattering) are defined. The dependences illustrating the frequency of emergence of each collision mode and allowing predicting the collision modes are received.

It is shown that on the basis of the revealed consequences of collisions of liquid droplets it is possible to choose parameters of its giving in a zone of a flame and an arrangement of sprays (relatively each other). The demanded crushing of a stream of droplets or their integration will be provided thus.

Keywords: flame; high-temperature gases; water spray; droplets; collision; coagulation; fragmentation.

REFERENCES

1. Salamov A. A. Sovremennaya sistema pozharotusheniya "vodyanoy tuman" vysokogo davleniya [Modern fire extinguishing system "a water fog" high pressure]. *Energetik — Power & Electrical Engineering*, 2012, no. 3, pp. 16–18.
2. Terpigoryev V. S. Vodyanoy tuman kak sredstvo zashchity obyektov kultury [Water mist as a means of cultural objects protection]. *Algoritm bezopasnosti — Security Algorithm*, 2006, no. 5, pp. 18–20.
3. Vinogradov A. G. Uchet spektralnogo sostava teplovogo izlucheniya pri raschete koeffitsienta propuskaniya kapli vody [Accounting of thermal radiation spectral distribution at calculation of water droplet transmittance]. *Pozharovzryvbezopasnost — Fire and Explosion Safety*, 2013, vol. 22, no. 9, pp. 64–73.
4. Vinogradov A. G. Metodika rascheta ekraniruyushchikh svoystv vodyanykh zaves [Calculation method of water curtain shielding properties]. *Pozharovzryvbezopasnost — Fire and Explosion Safety*, 2014, vol. 23, no. 1, pp. 45–56.
5. Vinogradov A. G. Primeneniye teorii zatoplennykh struy k raschetu parametrov vodyanykh zaves [Application of the submerged jet theory to calculation of water curtain parameters]. *Pozharovzryvbezopasnost — Fire and Explosion Safety*, 2014, vol. 23, no. 5, pp. 76–87.
6. Karpov A. I., Novozhilov V. B., Galat A. A., Bulgakov V. K. Numerical modeling of the effect of fine water mist on the small scale flame spreading over solid combustibles. *Fire Safety Science: Proceeding of Eight International Symposium*, 2005, vol. 27, pp. 753–764.
7. Korolchenko D. A., Gromovoy V. Yu., Vorogushin O. O. Primeneniye tonkoraspynennoy vody dlya tusheniya pozharov v vysotnykh zdaniyakh [Fire extinguishing in tall buildings by using water mist systems]. *Pozharovzryvbezopasnost — Fire and Explosion Safety*, 2011, vol. 20, no. 9, pp. 54–57.
8. Sokovikov V. V., Tugov A. N., Grishin V. V., Kamyshev V. N. Avtomaticheskoye vodyanoye pozharotusheniye s primeneniye tonkoraspynennoy vody na elektrostantsiyakh [Automatic water fire extinguishing with using of sprayed water at power plants]. *Energetik — Power & Electrical Engineering*, 2008, no. 6, pp. 37–38.
9. Segal M. D. Ispolzovaniye tonkoraspynennoy vody dlya povysheniya protivopozharnoy zashchity kabelnykh sooruzheniy AES [The water mist system for cable construction of nuclear power plant fire protection]. *Problemy bezopasnosti i chrezvychaynykh situatsiy — Problems of Safety and Emergency Situations*, 2011, no. 4, pp. 61–64.
10. Volkov R. S., Kuznetsov G. V., Strizhak P. A. Chislennaya otsenka optimalnykh razmerov kapel vody v usloviyakh yeye raspyleniya sredstvami pozharotusheniya v pomeshcheniyakh [Numerical estimation of optimum sizes for water drops at the conditions of its dispersion by firefighting devices at place-ments]. *Pozharovzryvbezopasnost — Fire and Explosion Safety*, 2012, vol. 21, no. 5, pp. 74–78.

11. Shchetinskiy E. A. *Tusheniye lesnykh pozharov* [Forest fire extinguishing]. Moscow, VNIILM Publ., 2008. 328 p.
12. Baratov A. N. *Goreniye — Pozhar — Vzryv — Bezopasnost* [Burning — Fire — Explosion — Safety]. Moscow, All-Russian Research Institute for Fire Protection of Emercom of Russia Publ., 2003. 364 p.
13. Gorshkov V. I. *Tusheniye plameni goryuchikh zhidkostey* [Flammable liquids flames extinguishing]. Moscow, Pozhnauka Publ., 2007. 268 p.
14. Vysokomornaya O. V., Kuznetsov G. V., Strizhak P. A. *Teplomassoperenos pri dvizhenii kapel vody v vysokotemperaturnoy gazovoy srede* [Heat and mass transfer in the process of movement of water drops in a high-temperature gas medium]. *Inzhenerno-fizicheskiy zhurnal — Journal of Engineering Physics and Thermophysics*, 2013, vol. 86, no. 1, pp. 59–65.
15. Zhdanova A. O., Kuznetsov G. V., Strizhak P. A. *Vliyaniye raspredeleniya kapel vody v “vodyanom snaryade” na temperaturu v yego slede* [Influence of water droplets distribution in the “water shell” on temperature in follow movement]. *Pozharovzryvbezopasnost — Fire and Explosion Safety*, 2013, vol. 22, no. 2, pp. 9–17.
16. Volkov R. S., Kuznetsov G. V., Strizhak P. A. *O nekotorykh fizicheskikh zakonornostyakh ispareniya raspylennoy vody pri dvizhenii cherez vysokotemperaturnyye produkty sgoraniya* [About some physical evaporation regularities of the sprayed water at movement through high-temperature combustion products]. *Izvestiya Tomskogo politekhnicheskogo universiteta — Bulletin of the Tomsk Polytechnic University*, 2013, vol. 323, no. 2, pp. 201–207.
17. Volkov R. S., Kuznetsov G. V., Strizhak P. A. *Eksperimentalnoye issledovaniye vliyaniya nachalnoy temperatury raspylennoy vody na intensivnost yeye ispareniya pri dvizhenii cherez plamyu* [Experimental investigation of initial temperature for sprayed water influence on the evaporation intensity at the moving through flame]. *Pozharovzryvbezopasnost — Fire and Explosion Safety*, 2014, vol. 23, no. 3, pp. 12–21.
18. Volkov R. S., Kuznetsov G. V., Strizhak P. A. *Vliyaniye nachalnykh parametrov raspylennoy vody na kharakteristiki yeye dvizheniya cherez vstrechnyy potok vysokotemperaturnykh gazov* [Influence of initial parameters of the sprayed water on characteristics of its movement through a counter flow of high-temperature gases]. *Zhurnal tekhnicheskoy fiziki — Technical Physics*, 2014, vol. 84, no. 7, pp. 15–23.
19. Volkov R. S., Kuznetsov G. V., Strizhak P. A. *Osobennosti ispareniya dvukh kapel vody, dvizhushchikhsya posledovatelno cherez vysokotemperaturnyye produkty sgoraniya* [Evaporation of two liquid droplets moving sequentially through high-temperature combustion products]. *Teplofizika i aeromekhanika — Thermophysics and Aeromechanics*, 2014, vol. 21, no. 2, pp. 269–272.
20. Keane R. D., Adrian R. J. *Theory of cross-correlation analysis of PIV images*. *Applied Scientific Research*, 1992, vol. 49, issue 3, pp. 191–215. doi: 10.1007/bf00384623.
21. Westerweel J. *Fundamentals of digital particle image velocimetry*. *Measurement Science and Technology*, 1997, vol. 8, no. 12, pp. 1379–1392. doi: 10.1088/0957-0233/8/12/002.
22. Foucaut J. M., Stanislas M. *Some considerations on the accuracy and frequency response of some derivative filters applied to particle image velocimetry vector fields*. *Measurement Science and Technology*, 2002, vol. 13, no. 7, pp. 1058–1071. doi: 10.1088/0957-0233/13/7/313.
23. Shenk Kh. *Teoriya inzhenernogo eksperimenta* [Theory of engineering experiment]. Moscow, Mir Publ., 1972. 381 p.
24. Zaydel A. N. *Elementarnyye otsenki oshibok izmereniy* [Simple estimates of measurement errors]. The Academy of Sciences of the USSR. Leningrad, Nauka Publ., 1968. 96 p.
25. Polezhaev Yu. V., Yuryevich F. B. *Teplovaya zashchita* [Thermal protection]. Moscow, Energiya Publ., 1976. 391 p.
26. Terekhov V. I., Pakhomov M. A. *Teplomassoperenos i gidrodinamika v gazokapelnykh potokakh* [Heat and mass transfer and hydrodynamics in gas-drop streams]. Novosibirsk, NSTU Publ., 2009. 284 p.

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

Ф. А. ПОРТНОВ, аспирант кафедры комплексной безопасности в строительстве, Московский государственный строительный университет (Россия, 129337, г. Москва, Ярославское шоссе, 26; e-mail: wastingtimefilmart@gmail.com)

А. А. КОБЕЛЕВ, канд. техн. наук, преподаватель кафедры пожарной безопасности в строительстве, Академия ГПС МЧС России (Россия, 129336, г. Москва, ул. Бориса Галушкина, 4)

Т. Г. БЕЛЬЦОВА, канд. техн. наук, преподаватель кафедры общей химии, Московский государственный строительный университет (Россия, 129337, г. Москва, Ярославское шоссе, 26; e-mail: t_belcova@mail.ru)

УДК 614.841

ВЛИЯНИЕ СТРУКТУРЫ ПОВЕРХНОСТНОГО СЛОЯ, ОБРАЗУЮЩЕГОСЯ ПРИ ТЕРМИЧЕСКОМ РАЗЛОЖЕНИИ ДРЕВЕСИНЫ, НА ЕЕ ДЫМООБРАЗУЮЩУЮ СПОСОБНОСТЬ

Исследована дымообразующая способность исходной и модифицированной древесины. Показано влияние фосфорорганических соединений на пористую структуру поверхностного слоя древесины и ее дымообразующую способность. Предложен механизм изменения структуры поверхностного слоя и влияния на дымообразующую способность древесины эфиров фосфористой кислоты. Показано, что лучшие дымоподавляющие свойства из выбранных соединений обнаружены у диэтилфосфита.

Ключевые слова: древесина; фосфорсодержащие соединения; эфиры фосфористой кислоты; поверхностная модификация; дымообразующая способность; пористая структура поверхностного слоя.

Проблема снижения дымообразующей способности материалов из древесины является актуальной [1–11], поскольку образующиеся при ее возгорании дым и токсичные продукты сгорания представляют собой один из опасных факторов пожара, несущих угрозу безопасности людей. Термическое разложение древесины сопровождается выделением летучих веществ и твердых частиц. В результате попадания твердых частиц в атмосферу происходит образование аэрозоля дыма, причем наибольшее выделение твердых частиц с поверхности древесного материала наблюдается в режиме тления. Задымление путей эвакуации приводит к дезориентации людей в пространстве, а также к отравлению их токсичными продуктами термического разложения строительных материалов и другой пожарной нагрузки. По данным МЧС РФ гибель людей из-за задымления и действия токсичных продуктов горения составляет более 70 % от общего числа случаев гибели людей на пожарах. В связи с этим снижение дымообразующей способности древесины является важным фактором снижения риска гибели людей на пожаре.

Изучалось дымообразование при термическом разложении нативной древесины сосны и сосны, поверхностно модифицированной 20 %-ными раство-

рами фосфорсодержащих соединений: диметилфосфита (ДМФ), диэтилфосфита (ДЭФ), дифенилфосфита (ДФФ), полифосфата аммония (ПФА) [12–14]. В качестве растворителей использовались вода (для ДЭФ и ДМФ) и ацетон (для остальных соединений). Расход полученных составов — 300 г/м².

Исследования проводились с использованием следующих современных методов:

- адсорбции азота — для изучения капиллярной структуры поверхностного карбонизованного слоя;
- ИК-спектроскопии и элементного анализа — для изучения химического процесса модифицирования поверхностного слоя.

Дымообразующая способность древесины определялась по ГОСТ 12.1.044–89 [15].

Для изучения капиллярной структуры были получены изотермы адсорбции азота поверхностного карбонизованного слоя нативной и модифицированной древесины (рис. 1).

Удельная площадь пор карбонизованного слоя приведена на рис. 2. Методом ВЈН [16, 17] было получено распределение пор поверхностного карбонизованного слоя древесины (табл. 1). На основании полученных данных можно сделать вывод, что наи-

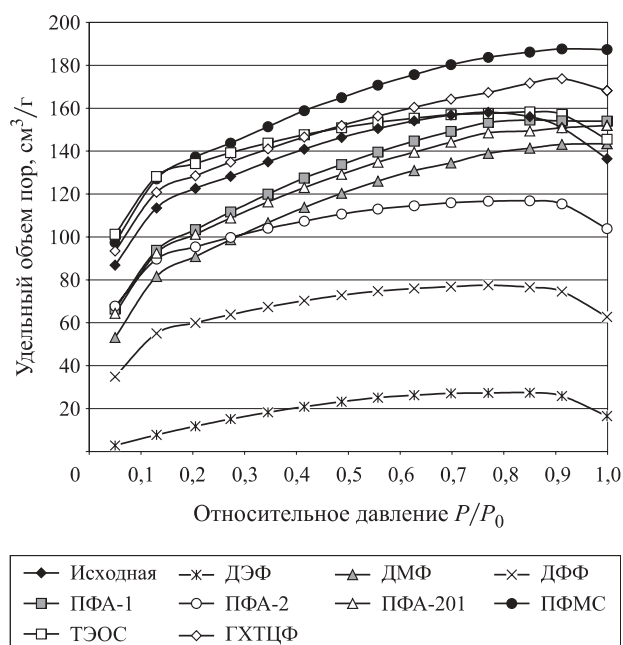


Рис. 1. Изотермы адсорбции азота поверхностного карбонизованного слоя нативной и модифицированной древесины

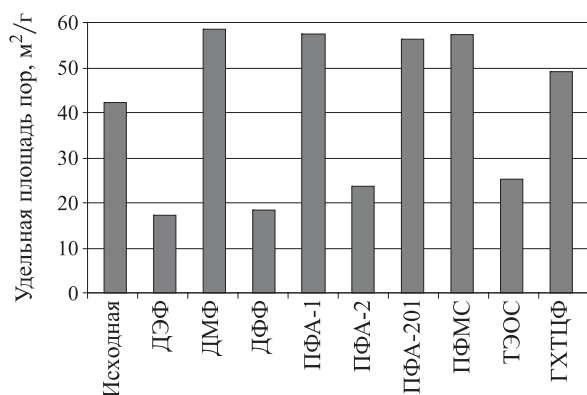


Рис. 2. Удельная площадь $S_{уд}$ пор поверхностного карбонизованного слоя нативной и модифицированной древесины

меньшая удельная площадь поверхности (см. рис. 2) и удельный объем пор (рис. 3) характерны для поверхностного карбонизованного слоя древесины, модифицированной ДЭФ. Наибольшие значения данных показателей характерны для исходной древесины и древесины, модифицированной ДФФ.

Снимки, полученные с помощью электронного микроскопа при увеличении $100\times$, приведены на рис. 4. Как видно из рис. 4,а, характер поверхностного слоя зависит от природы модификатора. Так, карбонизованный слой древесины, модифицированной ДМФ, представляет собой сплошное покрытие с видимыми устьями капилляров: явное модифицирование поверхности фибрилл отсутствует. В случае применения ДФФ (см. рис. 4,б) имеют место частично открытые устья капилляров, но сплошного покрытия при этом нет. Другая картина наблюдается в случае использования в качестве модификаторов

Таблица 1. Радиус и объем пор карбонизованного слоя нативной и модифицированной древесины

Радиус пор, Å	Удельный объем пор V , см³/г, для древесины				
	исходной	модифицированной			
		ДМФ	ДЭФ	ДФФ	ПФА-1
18,12–18,20	0,0161	0,0185	0,00706	0,00768	0,0177
21,36–21,49	0,0278	0,0339	0,0125	0,01309	0,0336
25,65–25,78	0,0375	0,0467	0,0157	0,0165	0,0471
31,57–31,84	0,0446	0,0582	0,0179	0,0186	0,0586
40,56–42,12	0,0478	0,0663	0,0184	0,0203	0,0686
56,21–59,07	–	0,0717	–	–	0,0711
89,95–92,26	–	0,0752	–	–	–
1575	–	0,0757	–	–	–

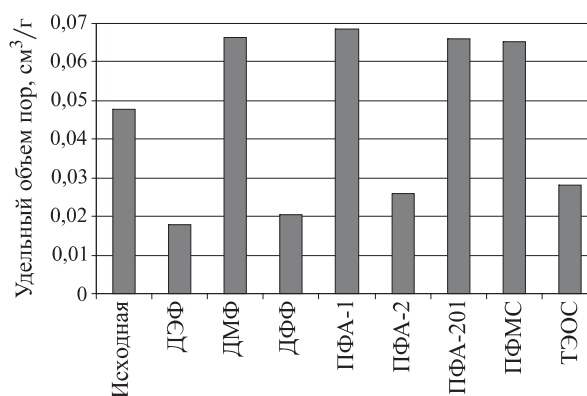


Рис. 3. Удельный объем пор поверхностного карбонизованного слоя нативной и модифицированной древесины радиусом 40,56–42,12 Å по методу ВЛН

ДЭФ и ПФА-1 (см. рис. 4,в,г): карбонизованный слой представляет собой исходные фибриллы, модифицированные ДЭФ или ПФА-1. При этом происходит укрепление и выстилание фибрилл модификатором.

Для изучения структуры поверхности карбонизованного слоя были использованы методы элементного анализа и ИК-спектроскопии. Данные элементного анализа поверхностного слоя модифицированной древесины до и после термического разложения (табл. 2) позволяют сделать вывод о том, что наибольшая степень образования устойчивых фосфорсодержащих соединений в поверхностном слое древесины при термическом разложении характерна для ДЭФ, а наименьшая — для ПФА.

Данные ИК-спектроскопии (рис. 5, табл. 3) были получены при анализе образцов поверхностного карбонизованного слоя модифицированной древесины с помощью ИК-Фурье-спектрометра Nicolet-6700. Оптическая плотность характеристических полос поглощения [18, 19] в образцах поверхностного карбонизованного слоя модифицированной древесины также представлена в табл. 3. В ИК-спектрах поверх-

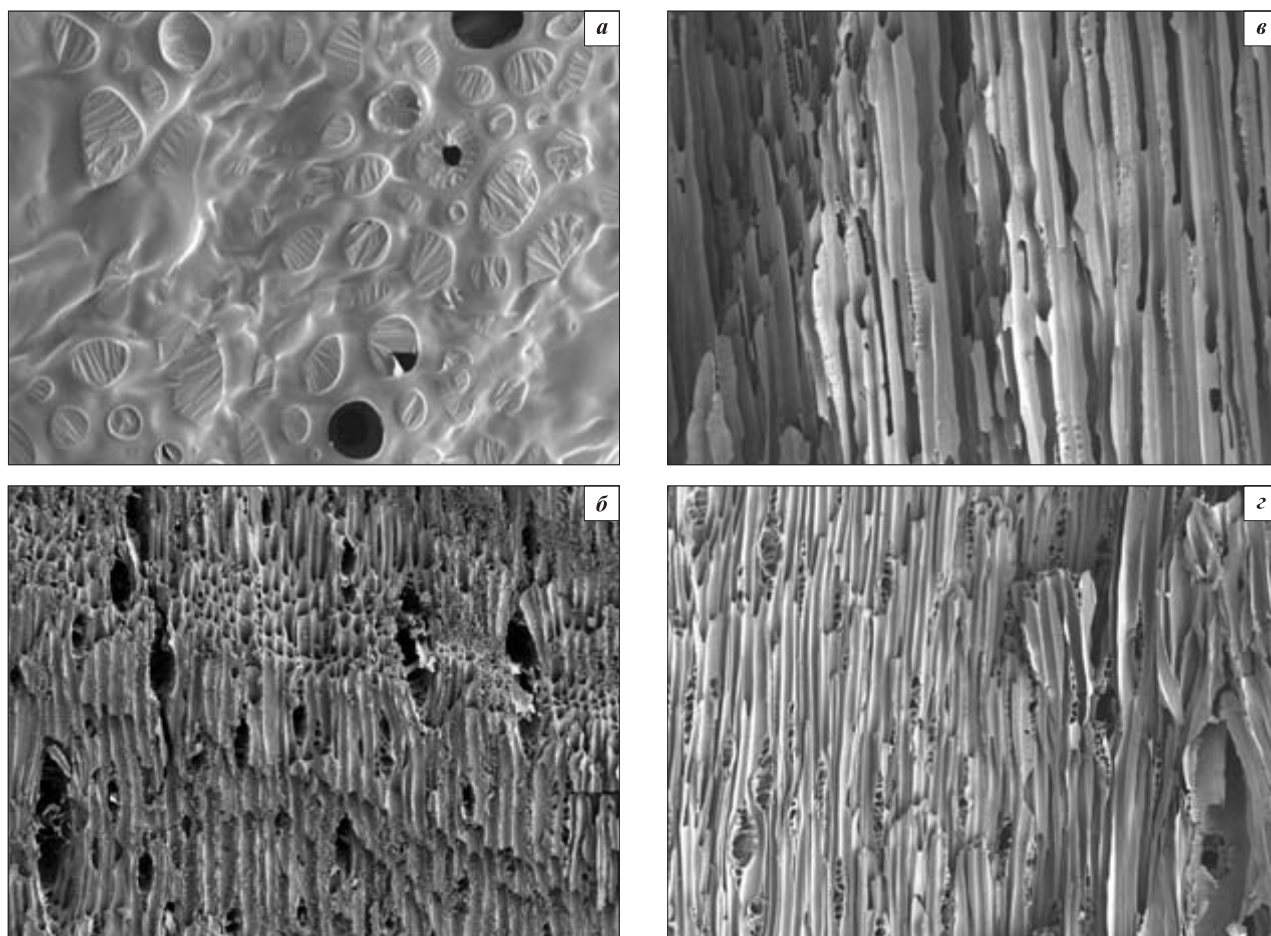


Рис. 4. Снимки карбонизованного слоя древесины, модифицированной ДМФ (а), ДФФ (б), ДЭФ (в) и ПФА-1 (г), полученные с помощью электронного микроскопа

ности карбонизованного слоя древесины, модифицированной ДЭФ и ПФА-1, отсутствует группа $\text{P}=\text{O}$ (1250 см^{-1}). Наибольшая оптическая плотность групп $\text{P}-\text{O}-\text{C}$ (1180 см^{-1}) наблюдается у древесины, модифицированной ДЭФ и ПФА-1, что свидетельствует о химическом взаимодействии карбонизованных структур с фосфорсодержащими соединениями. При термическом разложении древесины, модифицированной ДЭФ, образуются устойчивые, наиболее фосфорилированные ($\%\text{P} = 5,31$) структуры, укрепляющие фибриллы и обеспечивающие их термическую устойчивость.

Результаты исследований модифицированной древесины на дымообразующую способность проил-

люстрированы на рис. 6. Дымообразующую способность устанавливали на установке по определению дымообразующей способности полимерных материалов (по ГОСТ 12.1.044–89, п. 4.18) [15] в режиме тления при величине теплового потока 20 кВт/м^2 . При величине тепловых потоков 25 кВт/м^2 и выше происходит самовоспламенение древесины, в том числе модифицированной. Коэффициент дымообразования и группа материала по дымообразующей способности определялись для древесины в режиме тления, так как в режиме пламенного горения ее дымообразующая способность значительно ниже.

Более подробно результаты исследования дымообразующей способности древесины, модифициро-

Таблица 2. Результаты элементного анализа исходной и модифицированной древесины

Состояние древесины	Массовая доля фосфора, %					Исходная древесина
	ДЭФ	ДМФ	ДФФ	ПФА-1*	ПФА-201*	
До термического разложения	3,77	3,92	3,03	4,98	5,19	—
После термического разложения	5,31	3,17	1,32	0,81	0,12	—

* Экстракция образцов не проводилась.

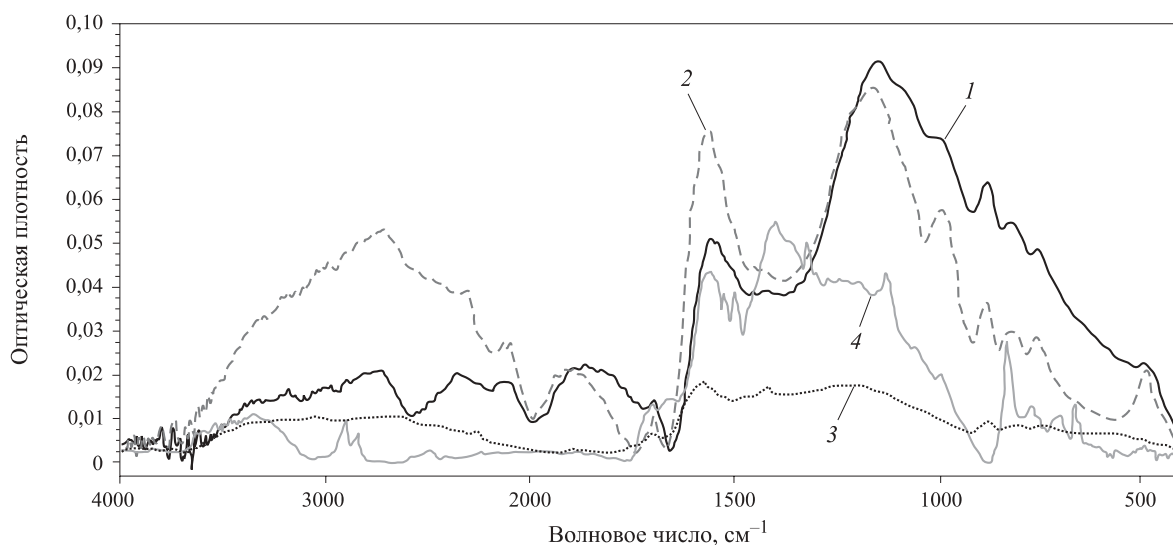


Рис. 5. ИК-спектры карбонизованного слоя древесины, модифицированной ДЭФ (1), ПФА-1 (2), ДФФ (3) и ДМФ (4)

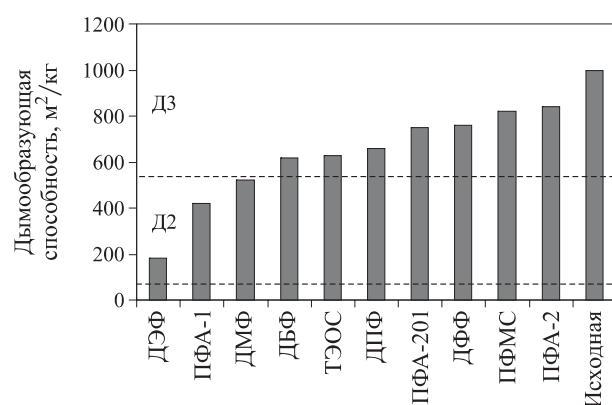


Рис. 6. Дымообразующая способность исходной и модифицированной древесины

ванной различными элементоорганическими соединениями, в широком диапазоне значений величины теплового потока и при различных режимах теплового воздействия были изложены в предыдущих работах авторов, например в [11].

Для испытаний были подготовлены образцы нативной и модифицированной древесины сосны размером 40×40 мм и толщиной 10 мм. Влажность древесины до испытаний составляла 15 % и определялась весовым методом при выдерживании образцов в эксикаторах над водно-солевым раствором. Время начала задымления отмечалось визуально при снижении видимости на 10 % (табл. 4).

Исследованиями установлено:

- наибольшая дымообразующая способность соответствует исходной древесине ($D_m = 1060 \text{ м}^2/\text{кг}$), наименьшая — древесине, модифицированной ДЭФ ($D_m = 180 \text{ м}^2/\text{кг}$);
- время начала задымления (см. табл. 4) наибольшее в случае применения ДЭФ, а при модифицировании древесины другими соединениями время начала задымления примерно одинаково;

Таблица 3. Оптическая плотность характеристических полос поглощения карбонизованного слоя древесины в зависимости от модификатора

Полоса поглощения, см^{-1}	Модификатор			
	ДЭФ	ДМФ	ДФФ	ПФА-1
950 (C–O–C)	0,075	0,020	0,010	0,065
1180 (P–O–C)	0,090	0,041	0,019	0,085
1250 (P=O)	–	0,040	0,016	–
1600 (аром.)	0,050	0,045	0,15	0,08
1700 (C=O)	0,013	0,0129	0,007	0,0127
2950 (CH_3)	0,032	0,010	0,010	0,050
2970 (ОН)	0,015	0,010	0,009	0,060

- наилучшие дымоподавляющие свойства показывает ДЭФ, который можно эффективно использовать для снижения дымовыделения при термическом разложении древесины и материалов на ее основе.

Предполагаемый механизм дымоподавления ДЭФ основан на повышении термостойкости поверхности карбонизованного слоя за счет укрепления фибрилл в поверхностном слое модификатором. Это блокирует диффузию твердых частиц с поверхности материала в газовую фазу и, как следствие, приводит к меньшему дымообразованию.

Наименьшая дымообразующая способность наблюдается у древесины, модифицированной ДЭФ ($D_m < 200 \text{ м}^2/\text{кг}$), что соответствует устойчивой груп-

Таблица 4. Время начала задымления при термическом разложении исходной и модифицированной древесины

Модификатор	ДЭФ	ДФФ	ДМФ	ПФА-1
Время начала задымления, с	90	45	55	60

пе Д2 по [20]. У исходной древесины коэффициент дымообразующей способности превышает $1000 \text{ м}^2/\text{кг}$ (группа Д3 в соответствии с [17]). К группе Д2 относится также древесина, модифицированная ДМФ

и ПФА-1, но значения D_m являются для них граничными с группой Д3. Древесина, модифицированная остальными из рассматриваемых соединений, имеет устойчивую группу Д3.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Ушков В. А., Невзоров Д. И., Копытин А. В., Лалаян В. М. Воспламеняемость и дымообразующая способность полимерных материалов, содержащих производные ферроцена // Пожаровзрывобезопасность. — 2014. — Т. 23, № 7. — С. 27–35.
2. Щеглов П. П., Иванников В. Л. Пожароопасность полимерных материалов. — М. : Стройиздат, 1992. — 110 с.
3. Butcher E. G., Parnell A. C. Smoke control in fire safety design. — London : E. & F. N. Spon, 1979. — 178 p.
4. Асеева Р. М., Серков Б. Б., Сивенков А. Б. Горение древесины и ее пожароопасные свойства : монография. — М. : Академия ГПС МЧС России, 2010. — 262 с.
5. Асеева Р. М., Заиков Г. Е. Горение полимерных материалов. — М. : Наука, 1981. — 280 с.
6. Пожары и пожарная безопасность в 2011 году. Статистика пожаров и их последствий : статистический сборник. — М. : ВНИИПО МЧС России, 2012. — 137 с.
7. 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. 40–46.
8. Корольченко Д. А., Лукьянов А. М., Агапов А. Г. О пожароопасности древесины при возведении мостов // Мир транспорта. — 2012. — Т. 42, № 4. — С. 158.
9. Агапов А. Г., Корольченко Д. А. Промышленная безопасность при реконструкции и строительстве новых мостов // Вестник МГСУ. — 2011. — № 1-1. — С. 434–439.
10. Sharovarnikov A. F., Korolchenko D. A. Fighting fires of carbon dioxide in the closed buildings // Applied Mechanics and Materials. — 2013. — Vol. 475–476. — P. 1344–1350. doi: 10.4028/www.scientific.net/amm.475-476.1344.
11. Gorshkov V. I., Korolchenko D. A., Shebeko Yu. N., Navtsenya V. Yu., Kostyukhin A. K. The peculiarities of application of gas-aerosol fire extinguishing tools in various rooms // Proceedings of Second International Seminar on Fire-and-Explosion Hazard of Substances and Venting of Deflagrations. — Moscow : All-Russian Research Institute for Fire Protection Publ., 1997. — P. 800–808.
12. Покровская Е. Н., Кобелев А. А., Нагановский Ю. К. Механизм и эффективность огнезащиты фосфоркремнийорганических систем для древесины // Пожаровзрывобезопасность. — 2009. — Т. 18, № 3. — С. 44–48.
13. Кобелев А. А. Разработка комплексного огнебиозащитного состава на основе соединений, обеспечивающих поверхностную модификацию древесины : дис. ... канд. техн. наук. — М. : Академия ГПС МЧС России, 2012. — 128 с.
14. Покровская Е. Н., Кобелев А. А. Огнезащита древесины на современном этапе // Вестник Академии Государственной противопожарной службы. — 2007. — № 7. — С. 76–85.
15. ГОСТ 12.1.044–89*. ССБТ. Пожаровзрывоопасность веществ и материалов. Номенклатура показателей и методы их определения. — Введ. 01.01.91 г. — М. : Изд-во стандартов, 1989; ИПК “Изд-во стандартов”, 1996; 2001.
16. Ролдугин В. И. Физикохимия поверхности : учебник-монография. — Долгопрудный : Изд. дом “Интеллект”, 2011. — 568 с.
17. Кельцев Н. В. Основы адсорбционной техники : монография. — 2-е изд., перераб. и доп. — М. : Химия, 1984. — 592 с.
18. Наканиси К. Инфракрасные спектры и строение органических веществ. — М. : Мир, 1965. — 219 с.
19. Bikales N. M., Segal L. (eds.). Cellulose and cellulose derivatives. — New York : Wiley-Interscience, 1971. — 127 p.
20. Технический регламент о требованиях пожарной безопасности : Федер. закон от 22.08.2008 № 123-ФЗ (в ред. от 10.07.2012 № 117-ФЗ, 02.07.2013 № 185-ФЗ) // Собр. законодательства РФ. — 2008. — № 30 (ч. I), ст. 3579.

Материал поступил в редакцию 21 июня 2014 г.

INFLUENCE OF SURFACE LAYER STRUCTURE FORMED DURING THERMAL DEGRADATION OF WOOD ON SMOKE GENERATION PROPERTY

POKROVSKAYA E. N., Doctor of Technical Sciences, Professor, Professor of Department of General Chemistry, Moscow State University of Civil Engineering (Yaroslavskoye Shosse, 26, Moscow, 129337, Russian Federation; e-mail address: elenapokrovskaya@bk.ru)

PORTNOV F. A., Postgraduate Student of Department of Integrated Safety in Construction, Moscow State University of Civil Engineering (Yaroslavskoye Shosse, 26, Moscow, 129337, Russian Federation; e-mail address: wastingtimefilmart@gmail.com)

KOBELEV A. A., Candidate of Technical Sciences, Lecturer of Department of Fire Safety in Construction, State Fire Service Academy of Emercom of Russia (Borisa Galushkina St., 4, Moscow, 129336, Russian Federation)

BELTSOVA T. G., Candidate of Technical Sciences, Lecturer of Department of General Chemistry, Moscow State University of Civil Engineering (Yaroslavskoye Shosse, 26, Moscow, 129337, Russian Federation; e-mail address: t_belcova@mail.ru)

ABSTRACT

Wood — hazard material that generate a lot of smoke in case of fire. In combination with toxic gases of thermal degradation it may result in destructive consequences include deaths. Some fire retardants are capable to change thermal degradation process of wood reducing the number of smoke. In that paper influence of phosphorus-containing compounds on smoke generation have been considered.

In paper there are used some of the physico-chemical methods (porous structure methods BET/BJH, IR-spectroscopy, elemental analysis) and standard method for determination of smoke generation properties of building materials. In the result the most effective compound and offered the mechanism of effective smoke suppression in the presence of diethylphosphate are selected.

Wood with diethylphosphite in case of fire has the minimal smoke generation. This effect can be explain by analysis of porous structure of surface layer after thermal degradation. Results of elemental analysis and IR-spectroscopy indicate high content of elemental phosphorus in the surface layer.

Keywords: wood; timber; phosphorus-containing compounds; esters of phosphorous acid; surface modification; smoke generation property; porous structure; thermal degradation.

REFERENCES

1. Ushkov V. A., Nevzorov D. I., Kopytin A. V., Lalayan V. M. *Vosplamenyayemost i dymobrazuyushchaya sposobnost polimernykh materialov, soderzhashchikh proizvodnyye ferrotsena* [Flammability and smoke-forming ability of polymeric materials containing ferrocene derivatives]. *Pozharovzryvbezopasnost — Fire and Explosion Safety*, 2014, vol. 23, no. 7, pp. 27–35.
2. Shcheglov P. P., Ivannikov V. L. *Pozharoopasnost polimernykh materialov* [Fire hazards of polymeric materials]. Moscow, Stroyizdat, 1992. 110 p.
3. Butcher E. G., Parnell A. C. *Smoke control in fire safety design*. London, E. & F. N. Spon, 1979. 178 p.
4. Aseeva R. M., Serkov B. B., Sivenkov A. B. *Goreniye drevesiny i yeye pozharoopasnyye svoystva. Momografiya* [The burning of wood and its flammable properties. Monograph]. Moscow, State Fire Academy of Emercom of Russia Publ., 2010. 262 p.
5. Aseeva R. M., Zaikov G. E. *Goreniye polimernykh materialov* [The combustion of polymeric materials]. Moscow, Nauka Publ., 1981. 280 p.
6. *Pozhary i pozhar'naya opasnost v 2011 godu. Statistika pozharov i ikh posledstviy. Statisticheskiy sbornik* [Fires and fire safety in the 2011 year. Statistics of the fires and their consequences. The statistical compilation]. Moscow, All-Russian Research Institute for Fire Protection Publ., 2012. 137 p.
7. Pokrovskaya E. N., Portnov F. A., Kobelev A. A., Korolchenko D. A. *Dymobrazuyushchaya sposobnost i toksichnost produktov sgoraniya drevesnykh materialov pri poverkhnostnom modifitsirovani elementoorganicheskimi soyedineniyami* [The smoke generation property and combustion products toxicity of wood which was modified by organoelemental compounds]. *Pozharovzryvbezopasnost — Fire and Explosion Safety*, 2013, vol. 22, no. 10, pp. 40–46.

8. Korolchenko D. A., Lukyanov A. M., Agapov A. G. O pozharoopasnosti drevesiny pri vozvedenii mostov [About the fire hazard of wood in the building of bridges]. *Mir transporta — World of Transport*, 2012, vol. 42, no. 4, p. 158.
9. Agapov A. G., Korolchenko D. A. Promyshlennaya bezopasnost pri rekonstruktsii i stroitelstve novykh mostov [Industrial safety while constructing and rehabilitating bridges]. *Vestnik MGSU — Proceedings of Moscow State University of Civil Engineering*, 2011, no. 1-1, pp. 434–439.
10. Sharovarnikov A. F., Korolchenko D. A. Fighting fires of carbon dioxide in the closed buildings. *Applied Mechanics and Materials*, 2013, vol. 475–476, pp. 1344–1350. doi: 10.4028/www.scientific.net/amm.475-476.1344.
11. Gorshkov V. I., Korolchenko D. A., Shebeko Yu. N., Navtsenya V. Yu., Kostyukhin A. K. The peculiarities of application of gas-aerosol fire extinguishing tools in various rooms. *Proceedings of Second International Seminar on Fire-and-Explosion Hazard of Substances and Venting of Deflagrations*. Moscow, All-Russian Research Institute for Fire Protection Publ., 1997, pp. 800–808.
12. Pokrovskaya Ye. N., Kobelev A. A., Naganovskiy Yu. K. Mekhanizm i effektivnost ogneshchity fosforkremniyorganicheskikh sistem dlya drevesiny [Mechanism and efficiency of flame retardance of phosphorussiliconorganic systems for wood]. *Pozharovzryvobezopasnost — Fire and Explosion Safety*, 2009, vol. 18, no. 3, pp. 44–48.
13. Kobelev A. A. *Razrabotka kompleksnogo ogneshchitnogo sostava na osnove soyedineniy, obespechivayushchikh poverkhnostnyuyu modifikatsiyu drevesiny. Dis. kand. tekhn. nauk* [Development of complex fire and moisture resistant structure based on connections for surface modification of wood. Cand. tech. sci. diss.]. Moscow, State Fire Academy of Emercom of Russia Publ., 2012. 128 p.
14. Pokrovskaya E. N., Kobelev A. A. Ogneshchita drevesiny na sovremennom etape [Fire protection of wood at the present stage]. *Vestnik Akademii Gosudarstvennoy protivopozharnoy sluzhby — Bulletin of the State Fire Academy*, 2007, no. 7, pp. 76–85.
15. *Interstate Standard 12.1.044–89*. Occupational safety standards system. Fire and explosion hazard of substances and materials. Nomenclature of indices and methods of their determination*. Moscow, Izdatelstvo standartov, 1989; IPK Izdatelstvo standartov, 1996; 2001 (in Russian).
16. Roldugin V. I. *Fizikokhimiya poverkhnosti* [Physical chemistry of surfaces]. Dolgoprudnyy, Intellect Publ., 2011. 568 p.
17. Keltsev N. V. *Osnovy adsorbtsionnoy tekhniki. Monografiya* [Fundamentals of adsorption technology. Monograph]. Moscow, Khimiya Publ., 1984. 592 p.
18. Nakanishi K. *Infrared absorption spectroscopy — Practical*. San Francisco, Holden-Day, Inc., 1962. 233 p. (Russ. ed.: *Infrakrasnyye spektry i stroyeniye organicheskikh veshchestv*. Moscow, Mir Publ., 1965. 219 p.).
19. Bikales N. M., Segal L. (eds.). *Cellulose and cellulose derivatives*. New York, Wiley-Interscience, 1971. 127 p.
20. Technical regulations for fire safety requirements. Federal Law on 22. 07. 2008 No. 123. *Sobraniye zakonodatelstva RF — Collection of Laws of the Russian Federation*, 2008, no. 30 (part I), art. 3579 (in Russian).

А. В. КАЛАЧ, д-р хим. наук, доцент, заместитель начальника по научной работе, Воронежский институт ГПС МЧС России (Россия, 394052, г. Воронеж, ул. Краснознаменная, 231; e-mail: a_kalach@mail.ru)

Ю. Н. СОРОКИНА, канд. техн. наук, доцент, доцент кафедры химии и процессов горения, Воронежский институт ГПС МЧС России (Россия, 394052, г. Воронеж, ул. Краснознаменная, 231; e-mail: sorokina-jn@mail.ru)

Т. В. ЧЕРНИКОВА, канд. хим. наук, доцент кафедры химии и процессов горения, Воронежский институт ГПС МЧС России (Россия, 394052, г. Воронеж, ул. Краснознаменная, 231)

УДК 614.841.41

ПРОГНОЗИРОВАНИЕ ПОЖАРООПАСНЫХ СВОЙСТВ АНТРАХИНОНОВЫХ КРАСИТЕЛЕЙ С ПРИМЕНЕНИЕМ ДЕСКРИПТОРОВ

Исследовано влияние структуры молекул антрахиноновых красителей на их пожароопасные свойства. Для описания химического строения молекул исследуемых соединений рассчитаны значения топологических индексов, геометрических и электростатических дескрипторов. Проведен анализ линейной корреляции между дескрипторами и нижним концентрационным пределом распространения пламени. Предпринята попытка прогнозирования нижнего концентрационного предела распространения пламени антрахиноновых красителей на основе данных о молекулярных дескрипторах. Предложено и апробировано уравнение для расчета нижнего концентрационного предела распространения пламени антрахиноновых красителей.

Ключевые слова: антрахиноновые красители; дескрипторы; прогнозирование; пожароопасные свойства; нижний концентрационный предел распространения пламени.

Синтетические красители можно отнести к химическим соединениям, находящим широкое применение практически во всех отраслях промышленности. В настоящее время органические красители используют для окрашивания природных и синтетических волокон, пластических масс, резины, бумаги, дерева, кожи, меха и других материалов. Мировое производство синтетических красителей сегодня составляет порядка миллиона тонн в год. Создание новых материалов требует разработки более совершенных красителей, поэтому их ассортимент постоянно расширяется [1].

Органические красители представляют собой порошкообразные горючие материалы, что делает пыли или пылевоздушные смеси красителей пожаро- и взрывоопасными. Следовательно, при хранении красителей на складах, а также при непосредственном использовании их в технологическом процессе необходимо соблюдать особые меры предосторожности. Для разработки системы мер по предотвращению возникновения пожаров и взрывов, а также для оценки условий их развития и подавления необходимы сведения о пожароопасных свойствах органических красителей. Характеристики пожароопасности для ряда известных красителей измерены экспериментально и приведены в справочной литературе [2]. Известны работы, в которых

изучена взрывоопасность азокрасителей, в частности приведены расчеты температуры вспышки и теплоты взрыва [3, 4].

В то же время в связи с появлением на рынке новых красящих соединений остается актуальной проблема разработки универсальных экспрессных методов оценки их пожароопасности, не требующих существенных временных и материальных затрат. Такие методы, базирующиеся на содержащихся в справочниках экспериментальных данных, позволяют прогнозировать пожароопасные свойства для новых, еще не изученных соединений.

Одним из перспективных методов прогнозирования свойств органических соединений является дескрипторный метод QSPR (Quantitative Structure – Property Relationship), основанный на установлении аналитических зависимостей между химическим строением молекул веществ, описываемым с помощью дескрипторов, и различными свойствами соединений (физико-химическими, пожароопасными, биологической активностью и т. д.). Например, известны результаты исследований возможности применения дескрипторного метода для прогнозирования сродства между азо- и антрахиноновыми красителями и целлюлозным волокном [5], а также температуры вспышки органических соединений [6].

Авторами данной работы установлено, что дескрипторный метод дает удовлетворительные результаты при прогнозировании температуры вспышки различных классов органических соединений. Получены аппроксимационные уравнения для расчета температуры вспышки альдегидов, сложных эфиров, карбоновых кислот, аминов, кетонов на основе значений топологических индексов Винера и Рандича и геометрических дескрипторов — гравитационных индексов и площади поверхности молекулы [7, 8].

В настоящей работе в качестве объектов исследования выбран класс антрахиноновых красителей, которые представляют собой различные производные антрахинона [9, 10]. Структурные формулы соединений, использованных в исследовании, приведены на рисунке. Некоторые показатели пожарной опасности изучаемых веществ даны в табл. 1.

Пожаровзрывоопасность красителей зависит от строения их молекул [11, 12]. В результате анализа молекулярных структур красителей (см. рисунок) и их пожароопасных свойств (см. табл. 1) можно сделать вывод, что появление в структуре антрахинона аминогруппы не оказывает существенного влияния на температуру самовоспламенения вещества, в то время как наличие гидроксильной группы и групп, содержащих углеводородные радикалы, приводит к значительному снижению данного показателя. Нижний концентрационный предел распространения пламени (НКПР) для антрахинона, как правило, меньше, чем для его производных, что объясняется влиянием заместителей, присутствующих в структуре молекул.

Нижний и верхний концентрационные пределы распространения пламени — важнейшие показатели, определяющие пожаровзрывоопасность смесей горючих веществ с окислителем. Данные о концентрационных областях воспламенения включаются в стандарты и технические условия на газы, жидкости и твердые вещества, способные образовывать взрывоопасные газо-, паро- и пылевоздушные смеси. Информация о зонах негорючих концентраций веществ позволяет выбрать условия их хранения, использования и транспортировки, исключающие возможность возникновения пожара или взрыва. Концентрационные пределы распространения пламени необходимы при определении категории помещения и класса зон по взрывопожарной и пожарной опасности, при расчете предельно допустимых взрывобезопасных концентраций газов, паров и пылей в воздухе рабочей зоны с потенциальным источником зажигания, а также при разработке мероприятий по обеспечению пожарной безопасности.

Для твердых веществ определяющее значение имеет нижний концентрационный предел, поскольку

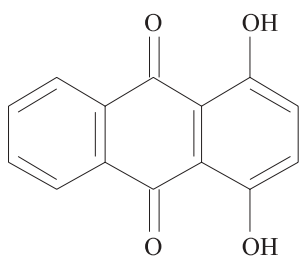
Таблица 1. Пожароопасные свойства антрахинона и красителей на его основе [2]

Вещество	Температура самовоспламенения, °С		НКПР, г/м ³	Максимальное давление взрыва, кПа
	аэрогеля	аэровзвеси		
Антрахинон	620	640	30	840
Ализарин	—	570	40	500
Хинизарин	630	630	47	850
2-Аминоантрахинон	620	625	50	690
1,2-Диаминоантрахинон	630	—	61	800
Пурпурин	513	490	84	855
Дисперсный оранжевый	520	—	25	—
Дисперсный розовый Ж	510	520	40	—
Дисперсный синий К	460	550	50	—
Дисперсный розовый 2С ПЭ	—	620	230	—
Дисперсный фиолетовый 2С	630	—	34	690
Активный синий П	570	625	130	—
Дисперсный красный 2С	630	600	60	—
Дисперсный синий 64-62 Ф п/э	650	—	50	680
Капрозол серый 2 “З”	600	—	65	850

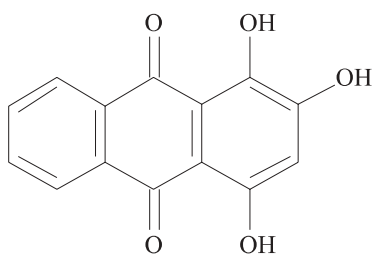
большие концентрации пыли практически не могут быть достигнуты в открытом пространстве. Считается, что если НКПР вещества менее 65 г/м³, то его пыль является взрывоопасной, если больше — пожароопасной [13].

Ввиду особой значимости НКПР для твердых порошкообразных материалов, а также в связи с тем, что эти данные представлены в литературе в наиболее полном объеме [2], в настоящей работе была предпринята попытка прогнозирования указанного показателя с помощью дескрипторного метода.

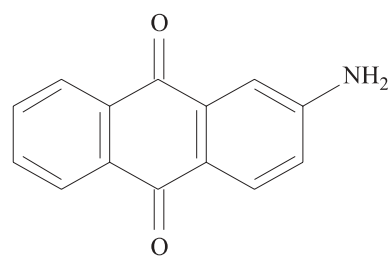
Для установления взаимосвязи между структурой молекул красителей и значениями НКПР были рассчитаны топологические индексы, геометрические и электростатические дескрипторы. С целью выбора дескрипторов, наиболее чувствительных к изменению структуры молекул, был проведен линейный корреляционный анализ, показывающий зависимость между значениями дескрипторов и НКПР. Результаты анализа представлены в табл. 2.



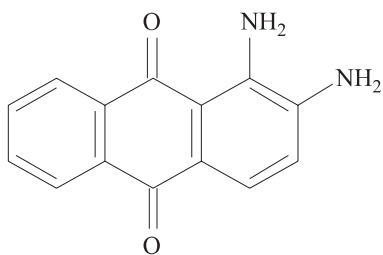
Хинизарин



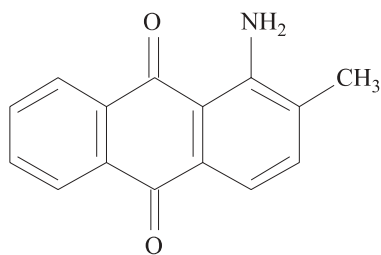
Пурпурин



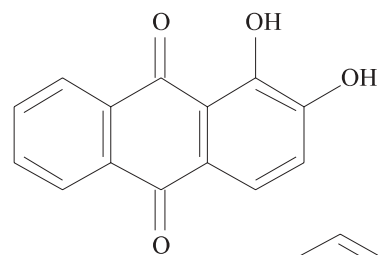
2-Аминоантрахинон



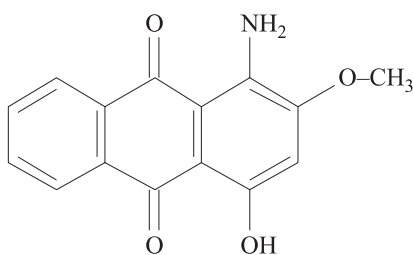
1,2-Диаминоантрахинон



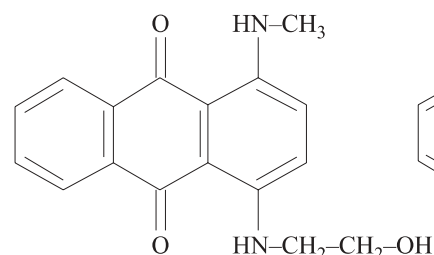
Дисперсный оранжевый



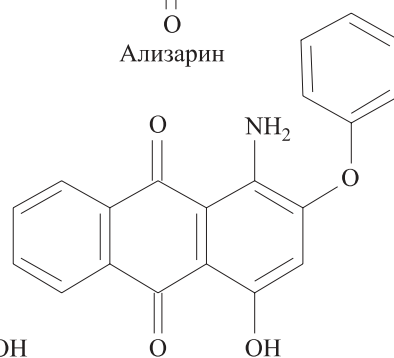
Ализарин



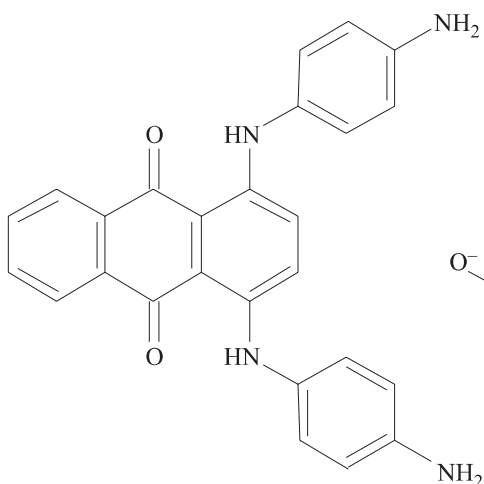
Дисперсный розовый Ж



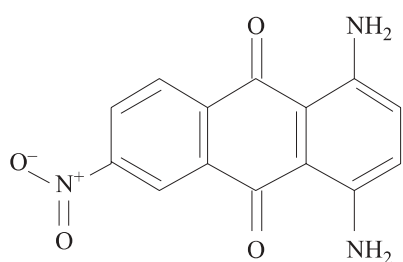
Дисперсный синий К



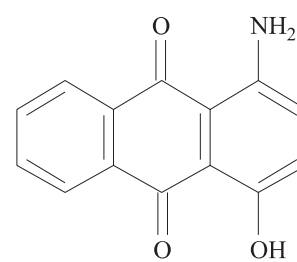
Дисперсный розовый 2С ПЭ



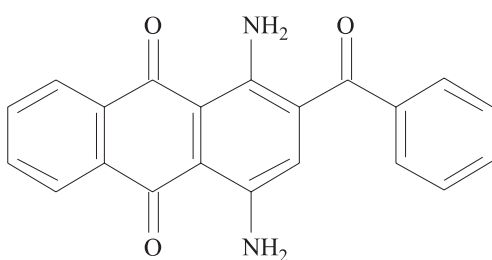
Капрозол серый 2 "3"



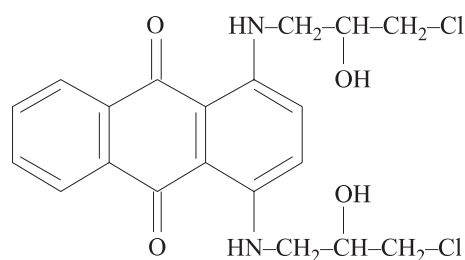
Дисперсный фиолетовый 2С



Дисперсный красный 2С



Дисперсный синий 64-62 Ф ПЭ



Активный синий П

Структурные формулы исследуемых красителей

Таблица 2. Анализ корреляционных зависимостей между дескрипторами и НКПР

Вид дескриптора	Название дескриптора	Коэффициент корреляции R^2
Топологические индексы	Индекс Винера (Wiener index)	0,2522
	Индекс Рандича (Randic index)	0,2902
	Информационное содержание (Information content)	0,2365
Геометрические дескрипторы	Гравитационный индекс — все связи (Gravitation index: all bonds)	0,3489
	Гравитационный индекс — все пары (Gravitation index: all pairs)	0,4171
	Площадь поверхности молекулы (Molecular surface area)	0,4290
	Проекция XY (XY Shadow)	0,2557
	Проекция YZ (YZ Shadow)	0,0958
	Проекция ZX (ZX Shadow)	0,1389
	Молекулярный объем (Molecular volume)	0,2932
Электростатические дескрипторы	Частично положительная площадь поверхности (Partial positive surface area)	0,0163
	Частично отрицательная площадь поверхности (Partial negative surface area)	0,3198
	Топографический электронный индекс — все пары (Topographic electronic index: all pairs)	0,6058
	Топографический электронный индекс — все связи (Topographic electronic index: all bonds)	0,5319

Как видно из табл. 2, лучшую корреляцию с показателем НКПР показали геометрические дескрипторы: гравитационный индекс — все пары G и площадь поверхности молекулы S , а также электростатические дескрипторы: топографические электрон-

Таблица 4. Проверка адекватности аппроксимационного уравнения

Краситель	Значение НКПР, г/м ³		Абсолютная погрешность расчетов, г/м ³
	расчетное	справочное [2]	
Ализарин	46	40	6
Хинизарин	44	47	3
2-Аминоантрахинон	30	50	20
Дисперсный синий 64-62 Ф ПЭ	78	50	28
Дисперсный красный 2С	42	60	18
1,2-Диаминоантрахинон	41	61	20
Пурпурин	58	84	26
Средняя абсолютная погрешность, г/м ³			17

ные индексы — все пары E_1 и все связи E_2 . В связи с этим данные дескрипторы были выбраны для получения аппроксимационной зависимости.

Для расчета коэффициентов корреляционного уравнения была сформирована рабочая выборка соединений. Значения дескрипторов для красителей, вошедших в рабочую выборку, приведены в табл. 3. Из табл. 3 следует, что между дескрипторами и показателем НКПР существует корреляционная взаимосвязь, а именно: с повышением НКПР наблюдается увеличение значений дескрипторов. На основе данных табл. 3 получено аппроксимационное уравнение для расчета НКПР:

$$\text{НКПР} = -8,52 + 232,1E_1 - 469,5E_2 - 0,0334G + 0,467S.$$

Для проверки адекватности уравнения была сформирована контрольная выборка веществ, для которых были рассчитаны значения НКПР и сопоставлены со справочными данными (табл. 4).

Таким образом, полученное аппроксимационное уравнение позволяет прогнозировать показатели НКПР антрахиноновых красителей со средней относительной погрешностью 30 %, которая обу-

Таблица 3. Значения дескрипторов и НКПР для веществ рабочей выборки

Вещество	Значение дескриптора				НКПР, г/м ³
	E_1	E_2	G	$S, \text{\AA}^2$	
Антрахинон	0,7645	0,3017	3103,3	217,8	30
Дисперсный фиолетовый 2С	1,3920	0,5405	4620,0	294,4	34
Дисперсный розовый Ж	1,7102	0,7214	4328,3	282,5	40
Дисперсный синий К	1,6152	0,6735	4764,3	344,6	50
Капрозол серый 2 “З”	1,8976	0,7086	7220,7	439,3	65
Активный синий П	2,6921	0,9733	7430,7	467,6	130

словлена разнообразным строением молекул красителей и присутствием различных заместителей.

Существующий метод расчета НКПР [2] предполагает использование данных по теплоте сгорания вещества, которые не всегда можно найти в справочной литературе. Предложенный в работе дескрипторный метод позволяет оценить указанный

показатель без использования каких-либо дополнительных экспериментальных данных.

На основе полученных результатов можно сделать заключение о перспективности применения дескрипторного метода в прогнозировании характеристик пожароопасности антрахиноновых красителей.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Карпов В. В., Белов А. Е. Современное состояние производства и потребления красителей // Российский химический журнал. — 2002. — Т. XLVI, № 1. — С. 67–71.
2. Корольченко А. Я., Корольченко Д. А. Пожаровзрывоопасность веществ и материалов и средства их тушения : справочник. В 2 ч. — М. : Пожнаука, 2004. Ч. I. — 713 с.; ч. II. — 774 с.
3. Kozak G. D., Vasin A. Ya., Dyachkova A. V. Explosion hazard of aromatic organic compounds containing one or two nitrocompounds // Central European Journal of Energetic Materials. — 2008. — Vol. 5, No. 2. — P. 49–55.
4. Kozak G. D., Vasin A. Ya., D'yachkova A. V. Estimating the explosion hazard of aromatic azo compounds // Combustion, Explosion and Shok Waves. — 2008. — Vol. 44, No. 5. — P. 579–582. doi: 10.1007/s10573-008-0087-9.
5. Timofei S., Schmidt W., Kurunczi L., Simon Z. A review of QSAR for dye affinity for cellulose fibres // Dyes and Pigments. — 2000. — Vol. 47, No. 1–2. — P. 5–16. doi: 10.1016/S0143-7208(00)00058-9.
6. Zhokhova N. I., Baskin I. I., Palyulin V. A., Zefirov A. N., Zefirov N. S. Fragmental descriptors in QSPR: flash point calculations // Russian Chemical Bulletin. — 2003. — Vol. 52, No. 9. — P. 1885–1892. doi: 10.1023/B:RUCB.0000009629.38661.4c.
7. Калач А. В., Карташова Т. В., Сорокина Ю. Н. Применение дескрипторов при прогнозировании пожароопасных свойств фармацевтических препаратов // Пожарная безопасность. — 2013. — № 3. — С. 105–108.
8. Калач А. В., Сорокина Ю. Н., Черникова Т. В., Чуйков А. М. Дескрипторный метод в прогнозировании пожароопасности органических веществ // Пожаровзрывобезопасность. — 2014. — Т. 23, № 9. — С. 38–44.
9. Степанов Б. И. Введение в химию и технологию органических красителей. — М. : Химия, 1984. — 592 с.
10. Бородкин В. Ф. Химия красителей. — М. : Химия, 1981. — 248 с.
11. Васин А. Я. Взаимосвязь химического строения и пожаровзрывоопасности органических красителей, лекарственных средств и их аэрозвесей : дис. ... д-ра техн. наук. — М. : РХТУ им. Д. И. Менделеева, 2008. — 320 с.
12. Васин А. Я., Райкова В. М. О влиянии химического строения органических веществ на взрывоопасность пылей // Пожаровзрывобезопасность. — 2007. — Т. 16, № 1. — С. 14–18.
13. Корольченко А. Я. Пожаровзрывоопасность промышленной пыли. — М. : Химия, 1986. — 216 с.

Материал поступил в редакцию 25 февраля 2015 г.

English

FORECASTING OF FIRE HAZARD PROPERTIES OF ANTHRAQUINONE DYES USING DESCRIPTORS

KALACH A. V., Doctor of Chemical Sciences, Docent, Deputy Head of the Institute for Research, Voronezh Institute of State Firefighting Service of Emercom of Russia (Krasnoznamennaya St., 231, Voronezh, 394052, Russian Federation; e-mail address: a_kalach@mail.ru)

SOROKINA Yu. N., Candidate of Technical Sciences, Docent, Docent of Chemistry and Combustion Department, Voronezh Institute of State Firefighting Service of Emercom of Russia (Krasnoznamennaya st., 231, Voronezh, 394052, Russian Federation; e-mail address: sorokina-jn@mail.ru)

CHERNIKOVA T. V., Candidate of Chemical Sciences, Docent of Chemistry and Combustion Department, Voronezh Institute of State Firefighting Service of Emercom of Russia (Krasnoznamennaya st., 231, Voronezh, 394052, Russian Federation)

ABSTRACT

Synthetic dyes are applied practically in all industries. World production of dyes increases every year, and their range is constantly expanding. Organic dyes are combustible, and their dusty-air mixtures represent a danger of fires and explosions. Consequently, in the development of measures to ensure fire safety is necessary to have information about the fire hazard properties of dyes.

Currently one of the most urgent tasks is to develop universal prediction methods of physical and chemical properties of organic compounds. Promising important method is the descriptors method based on establishing of dependency *the structure – properties*.

The purpose of this work — study the possibility of using the descriptor method for predicting the lower flammability limit (LFL) of anthraquinone dyes.

The analysis found that the best correlation with the index LFL observed for geometric descriptors (gravitation index: all pairs and the molecule surface area) and the electrostatic descriptors (topographic electronic indexes: all pairs and all bonds). On the basis of these data approximation equation for calculating the LFL was obtained.

Checking of the adequacy of the equation showed that the average relative error of estimate of LFL makes 30 %. Thus, the descriptors method can be used to assess the LEL of anthraquinone dyes.

Keywords: anthraquinone dyes; descriptors; forecasting; fire hazard properties; lower flammability limit.

REFERENCES

1. Karpov V. V., Belov A. E. Sovremennoye sostoyaniye proizvodstva i potrebleniya krasiteley [The current state of production and consumption of dyes]. *Rossiyskiy khimicheskiy zhurnal — Russian Chemical Journal*, 2002, vol. XLVI, no. 1, pp. 67–71.
2. Korolchenko A. Ya., Korolchenko D. A. *Pozharovzryvoopasnost veshchestv i materialov i sredstva ikh tusheniya: spravochnik v 2 ch.* [Fire and explosion hazard of substances and materials and their means of extinguishing: handbook in two parts]. Moscow, Pozhnauka Publ., 2004. Part I. 713 p.; part II. 774 p.
3. Kozak G. D., Vasin A. Ya., Dyachkova A. V. Explosion hazard of aromatic organic compounds containing one or two nitrocompounds. *Central European Journal of Energetic Materials*, 2008, vol. 5, no. 2, pp. 49–55.
4. Kozak G. D., Vasin A. Ya., D'yachkova A. V. Estimating the explosion hazard of aromatic azo compounds. *Combustion, Explosion and Shock Waves*, 2008, vol. 44, no. 5, pp. 579–582. doi: 10.1007/s10573-008-0087-9.
5. Timofei S., Schmidt W., Kurunczi L., Simon Z. A review of QSAR for dye affinity for cellulose fibres. *Dyes and Pigments*, 2000, vol. 47, no. 1–2, pp. 5–16. doi: 10.1016/S0143-7208(00)00058-9.
6. Zhokhova N. I., Baskin I. I., Palyulin V. A., Zefirov A. N., Zefirov N. S. Fragmental descriptors in QSPR: flash point calculations. *Russian Chemical Bulletin*, 2003, vol. 52, no. 9, pp. 1885–1892. doi: 10.1023/B:RUCB.0000009629.38661.4c.
7. Kalach A. V., Kartashova T. V., Sorokina Yu. N. Primeneniye deskriptorov pri prognozirovanii pozharoopasnykh svoystv farmatsevticheskikh preparatov [Application of descriptors in predicting of fire hazard of pharmaceuticals]. *Pozharnaya bezopasnost — Fire Safety*, 2013, no. 3, pp. 105–108.
8. Kalach A. V., Sorokina Yu. N., Chernikova T. V., Chuykov A. M. Deskriptornyy metod v prognozirovanii pozharoopasnosti organicheskikh veshchestv [Descriptor method in forecasting fire hazard of organic compounds]. *Pozharovzryvbezopasnost — Fire and Explosion Safety*, 2014, vol. 23, no. 9, pp. 38–44.
9. Stepanov B. I. *Vvedeniye v khimiyu i tekhnologiyu organicheskikh krasiteley* [Introduction to the chemistry and technology of organic dyes]. Moscow, Khimiya Publ., 1984. 592 p.
10. Borodkin V. F. *Khimiya krasiteley* [Chemistry dyes]. Moscow, Khimiya Publ., 1981. 248 p.
11. Vasin A. Ya. Vzaimosvyaz khimicheskogo stroyeniya i pozharovzryvoopasnosti organicheskikh krasiteley, lekarstvennykh sredstv i ikh aerovzvesey. Dis. dokt. tekhn. nauk [The relationship of chemical structure and fire hazard and explosiveness organic dyes, pharmaceuticals and aerosuspension. Dr. tech. sci. diss.]. Moscow, 2008. 320 p.
12. Vasin A. Ya., Raykova V. M. O vliyaniy khimicheskogo stroyeniya organicheskikh veshchestv na vzryvopasnost pyley [About the influence of the chemical structure of organic compounds on dust explosion hazard]. *Pozharovzryvbezopasnost — Fire and Explosion Safety*, 2007, vol. 16, no. 1, pp. 14–18.
13. Korolchenko A. Ya. *Pozharovzryvoopasnost promyshlennoy pyli* [Fire and explosion hazard of industrial dust]. Moscow, Khimiya Publ., 1986. 216 p.

А. И. НЕДОБИТКОВ, канд. техн. наук, доцент, кафедра информатики и математики, Казахский гуманитарно-юридический инновационный университет (Республика Казахстан, 070014, г. Усть-Каменогорск, ул. Астана, 48; e-mail: a.nedobitkov@mail.ru)

УДК 656.13;614.84

ЭКСПЕРТНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ АВТОМОБИЛЬНЫХ ЛАТУННЫХ КАБЕЛЬНЫХ НАКОНЕЧНИКОВ ПРОВОДА МАССЫ

Приведены результаты исследования на растровом электронном микроскопе с приставкой энергодисперсионного микроанализа латунных кабельных наконечников провода массы для автомобилей Lada RSO 15L-02U-41, Lada KS0Y5-02D-42, Lada 21144, полностью сгоревших в процессе пожара. Приведены фотоснимки поверхностей латунных наконечников, подвергшихся воздействию тока короткого замыкания. Установлены характерные диагностические признаки, позволяющие идентифицировать причину повреждения при пожаре латунных кабельных наконечников (электродуговой процесс или внешнее тепловое воздействие). Доказано, что на поверхности латунных контактов могут фиксироваться как классические признаки большого переходного сопротивления, так и сугубо специфичные для латунных контактов признаки — выделение цинка в виде шарообразных частиц. Установлено, что выявленные признаки являются устойчивыми и не подвергаются изменениям в естественных условиях хранения термически поврежденного автомобиля.

Ключевые слова: короткое замыкание; большое переходное сопротивление; цинк; латунь; растровая электронная микроскопия; наконечник провода массы; диагностический признак; пожарно-техническая экспертиза.

Введение

По данным аналитического агентства «Автостат» за последние 10 лет парк легковых автомобилей в Российской Федерации вырос почти на 60 % — с 25,57 млн. машин в начале 2006 г. до 40,85 млн. к началу 2015 г., и на 1 января 2015 г. на каждую тысячу россиян приходилось 284 автомобиля.

По данным Комитета административной полиции МВД Республики Казахстан в стране в период с 2007 по 2014 гг. практически в 1,5 раза вырос автопарк. Если в 2007 г. в Республике Казахстан было порядка 2,5 млн. единиц автотранспорта, то к концу 2014 г. насчитывалось уже порядка 4 млн. автомобилей, при этом в среднем на 1000 жителей республики приходилось около 230 автомобилей.

Как показывает опыт промышленно развитых стран, Российская Федерация и Республика Казахстан вступили в так называемую стадию “взрывного роста”, которая будет продолжаться до достижения уровня порядка 300–400 автомобилей на 1000 чел. Эта стадия является составной частью процесса “автомобилизации” и характеризуется резким осложнением обстановки с обеспечением безопасности движения и с пожарами на транспорте [1]. Более того, по данным В. И. Толстых число пожаров автотранспортных средств растет более высокими тем-

пами, чем развивается автопарк, хотя и отстает от динамики роста дорожно-транспортных происшествий.

В ряде работ [2] авторами показано, что пожарная опасность электросистемы автомобиля определяется тем, что ее отдельные элементы могут служить источником возгорания в случае возникновения аварийного режима в какой-либо функциональной цепи. На основе анализа статистических данных авторы [2–4] пришли к выводу, что основной причиной возгорания легковых автомобилей на сегодняшний день является неисправность их систем, механизмов и узлов. При этом они констатировали, что доля числа пожаров по причине технической неисправности увеличилась с 15,7 % в 2001 г. до 34,0 % в 2010 г. В 2012 г. суммарное число пожаров, происшедших по причине неисправности систем, механизмов и узлов транспортного средства и неисправности электропроводки транспортного средства, составило 7718 (40,0 %), что на 25 % превысило число пожаров, причиной возникновения которых в 2011 г. стала неисправность систем, механизмов и узлов транспортного средства (6174 ед., или 33,6 % от общего числа пожаров, происшедших на легковых автомобилях) [2, 3]. Сопоставимые результаты получены специалистами в США и Японии [5–8]. В настоящее время

пожары на транспорте в Республике Казахстан занимают второе место после пожаров в жилом секторе. Гипотетически возможна ситуация, при которой при уровне “автомобилизации” 500–700 автомобилей на 1000 чел. число пожаров автотранспортных средств будет сопоставимо с числом пожаров в жилом секторе.

Таким образом, разработка мероприятий по предотвращению пожаров на автотранспорте имеет важное значение. Одним из видов профилактических мероприятий является пожарно-техническая экспертиза.

По мнению автора [9], экспертиза пожаров основана на комплексе специальных знаний, необходимых для исследования места пожара, отдельных конструкций, материалов, изделий и их обгоревших остатков с целью получения информации, необходимой для установления очага пожара, его причины, путей распространения горения, установления природы обгоревших остатков, а также решения некоторых других задач, возникающих в ходе исследования и расследования пожара.

Следует указать, что подавляющее число выводов экспертов относительно технических причин пожаров автомобилей носит вероятностный характер, что не позволяет разрабатывать и внедрять конкретные инженерные решения [10]. Это может быть объяснено многими причинами, в том числе отсутствием научно обоснованных методик.

Необходимо также отметить, что, по мнению ряда авторов, методическое обеспечение экспертных исследований в рассматриваемой области сформировалось в основном более 15 лет тому назад и в настоящее время является явно недостаточным, в значительной степени затрудняя работу экспертов и пожарных дознавателей. В частности, в работах [11, 12] отмечается, что методики анализа оплавлений токоведущих изделий из латуни в судебной пожарно-технической экспертизе отсутствуют, хотя потребность в экспертном исследовании латунных контактов весьма велика.

В настоящей статье рассматриваются фактические примеры исследования латунных кабельных наконечников провода массы для автомобилей Lada RSO 15L-02U-41, Lada KS0Y5-02D-42 и двух — Lada 21144, которые полностью выгорели в процессе пожара. С момента пожара автомобиля до исследования прошло 2–4 мес.

Исследования проводились в Региональной университетской лаборатории инженерного профиля “ИГЕТАС” с использованием растрового электронного микроскопа JSM-6392LV с системой энергодисперсионного микроанализа INCAEnergy. Контактная поверхность кабельного наконечника провода мас-

сы подвергалась анализу без предварительной пробоподготовки.

Визуальное исследование латунных кабельных наконечников провода массы

Причиной, по которой на кабельный наконечник провода массы автомобиля Lada RSO 15L-02U-41 обратили внимание при осмотре автомобиля, является наличие непосредственно вокруг него окарины черного цвета. В ряде работ, в том числе [2, 9], отмечается, что состав окарины зависит от температуры ее образования. Причем чем выше температура окалинообразования, тем больше в окалине толщина слоя вустита (FeO , черного цвета) и меньше — гематита (Fe_2O_3 , рыжего цвета). Это обстоятельство дает возможность на основании внешнего осмотра окарины (по ее цвету и толщине) оценить интенсивность теплового воздействия на металл [2, 9]. Таким образом, поскольку слой окарины в области контактного соединения толстый, плотный и черного цвета, это свидетельствует о достаточно высокой температуре локального нагрева (порядка

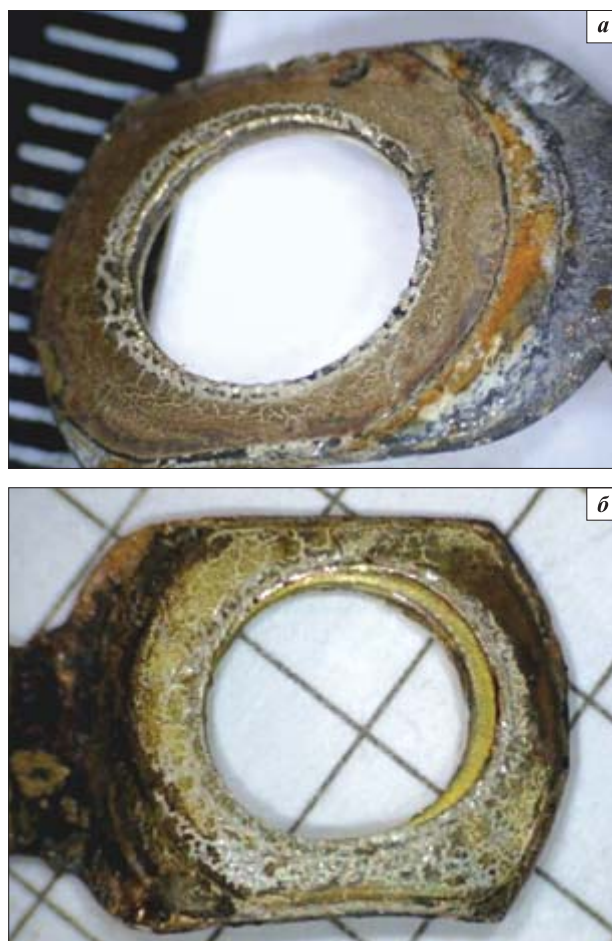


Рис. 1. Общий вид кабельных наконечников провода массы автомобилей с дефектами большого переходного сопротивления автомобилей Lada KS0Y5-02D-42 (а) и Lada RSO 15L-02U-41 (б)



Рис. 2. Повреждения кабельного наконечника провода массы автомобиля Lada 21144: *a* — общий вид; *б* — увеличение

900–1000 °С, но не выше, поскольку температура плавления латуни 880–950 °С). На контактной поверхности кабельного наконечника провода массы автомобиля Lada RSO 15L-02U-41 визуально наблюдаются трещины, каверны и неровности, характерные для протекания процесса большого переходного сопротивления (БПС) (рис. 1, *б*). Как показано в методике [13], большое переходное сопротивление, или, другими словами, “плохой контакт”, — это один из наиболее распространенных пожароопасных режимов в электросетях. По данным [13] только в редких случаях следы локального нагрева, возникающего при БПС, видны невооруженным глазом и зафиксировать наличие их несложно (рис. 2 и 3).

Визуальным осмотром кабельного наконечника провода массы автомобиля Lada 21144 установлено, что на его поверхности имеются локальные проплавления, свидетельствующие о местном нагреве металла до температуры выше температуры плавления 880–950 °С (см. рис. 2). Нити провода в обжиме не сплавлены, края повреждения латунного наконечника со стороны обжима закругленные, гладкие, без газовых пор и вырывов, что по данным [14] является признаком первичного короткого замыкания.



Рис. 3. Общий вид кабельного наконечника провода массы автомобиля Lada 21144

На контактной поверхности кабельного наконечника провода массы автомобиля Lada KS0Y5-02D-42 визуально наблюдаются трещины, каверны и неровности, характерные для протекания процесса большого переходного сопротивления (см. рис. 1, *a*). Кабельный наконечник провода массы автомобиля Lada 21144 приварен к корончатой шайбе, на нитях резьбы шпильки имеются цвета побежалости (рис. 3). Необходимо отметить, что латунь хорошо сваривается контактной сваркой, но не плавлением. В свою очередь, режим короткого замыкания по своей физической природе идентичен процессу электродуговой сварки [11]. Таким образом, на рис. 3 представлены повреждения кабельного наконечника провода массы, вызванные процессом короткого замыкания, а не температурой пожара.

Однако в большинстве случаев выявление и фиксация после пожара следов БПС представляют собой нелегкую задачу [9] (см. рис. 1 и 3). Экспертам при поисках следов БПС (если такие поиски проводятся вообще) приходится действовать интуитивно, так как непонятно, что собственно необходимо искать, какими методами и техническими средствами. Это приводит к тому, что на практике следы данного пожароопасного режима, как правило, не выявляются и его причастность к возникновению пожара не доказывается [9].

Морфологический анализ методом растровой электронной микроскопии

В ходе проведения морфологического исследования латунного кабельного наконечника автомобиля Lada KS0Y5-02D-42 методом растровой микроскопии уже при увеличении 43[×] наблюдаются признаки, характерные для электроэрозии (рис. 4, *a*). На рисунке видно, что рельеф поверхности неровный, следы механической обработки отсутствуют. При увеличении 150[×], 300[×] и 200[×] наблюдаются тре-

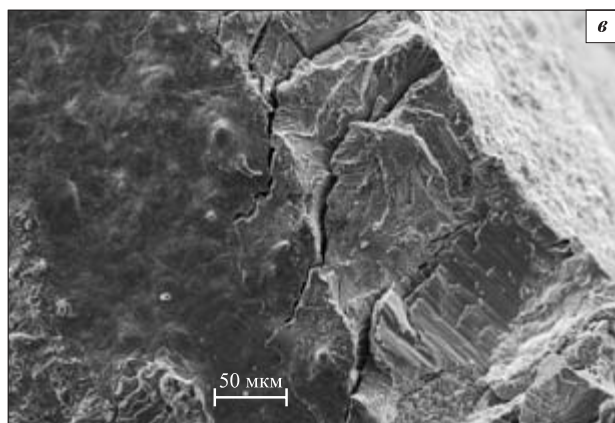
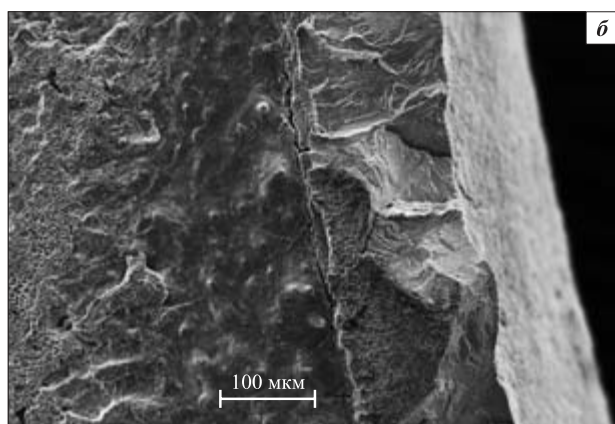
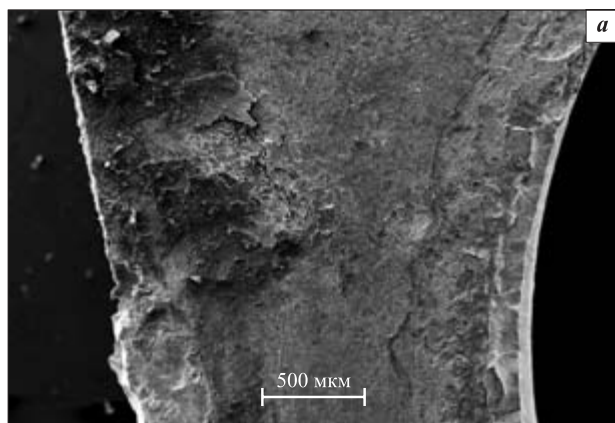


Рис. 4. Вид поверхности наконечника провода массы автомобиля Lada KS0Y5-02D-42 при увеличении $43\times$ (а), $150\times$ (б) и $300\times$ (в)

щины, микроплавления, кратеры, описанные в работе [13] (рис. 4, б, в и 5).

Приведенные на рис. 4 и 5 признаки наглядно свидетельствуют о том, что причиной повреждения контактной поверхности латунного наконечника провода массы автомобиля Lada KS0Y5-02D-42 явилось большое переходное сопротивление, а не воздействие высокой температуры в процессе пожара, признаки которого описаны в работе [14]. Относительно небольшое увеличение (до $300\times$) позволяет уточнить местоположение на объекте исследования признаков, характеризующих процесс разрушения,

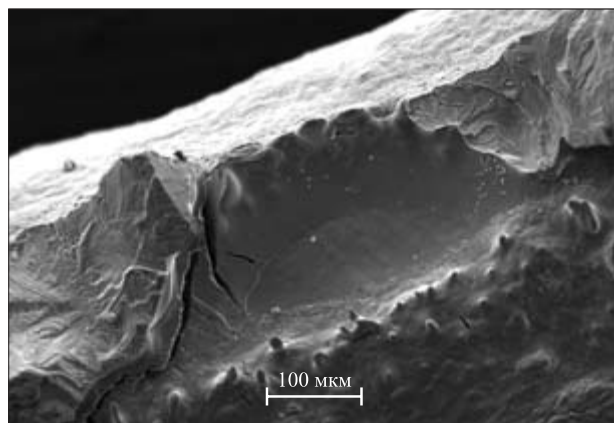


Рис. 5. Вид поверхности наконечника провода массы при увеличении $200\times$ (кратер, микроплавления)

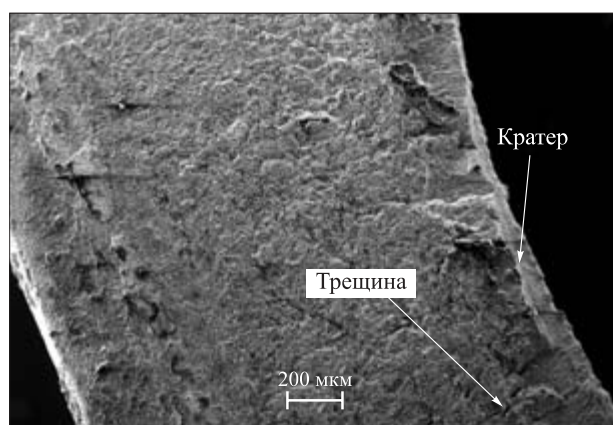


Рис. 6. Дефекты большого переходного сопротивления при увеличении $55\times$ (трещины и кратер электродугового разряда кабельного наконечника провода массы)

а увеличение $500\times$ – $1000\times$ и более — исследовать найденные признаки.

В ходе проведения морфологического исследования латунного кабельного наконечника автомобиля Lada RSO 15L-02U-41 методом растровой микроскопии уже при увеличении $55\times$ наблюдаются кратеры и трещины, характерные для электроэрозии (рис. 6). Из рисунка видно, что рельеф поверхности неровный, следы механической обработки отсутствуют.

В процессе дальнейшего исследования трещина, показанная на рис. 6, была рассмотрена при увеличении $1000\times$ (рис. 7).

Даже при увеличении $500\times$ на дне и на внутренних стенках кратера установлено наличие шарообразных частиц разного размера. В процессе дальнейшего исследования при помощи системы энергодисперсионного микроанализа INCAEnergy был определен химический состав в четырех точках кратера, соответствующих шарообразным частицам и ровной поверхности (рис. 9, см. таблицу). Как следует из таблицы, крупные и мелкие шарообразные

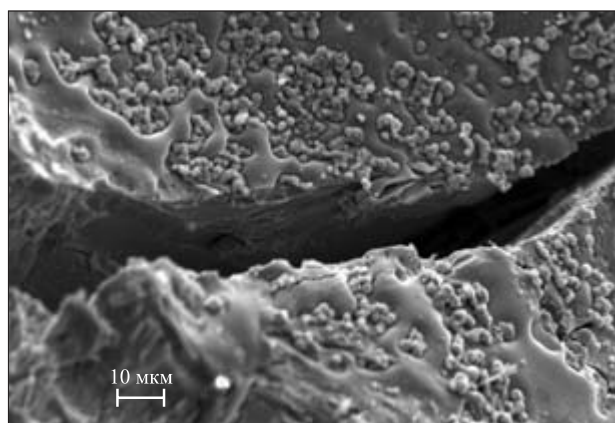


Рис. 7. Состояние поверхности в области трещины кабельного наконечника провода массы при увеличении $1000\times$

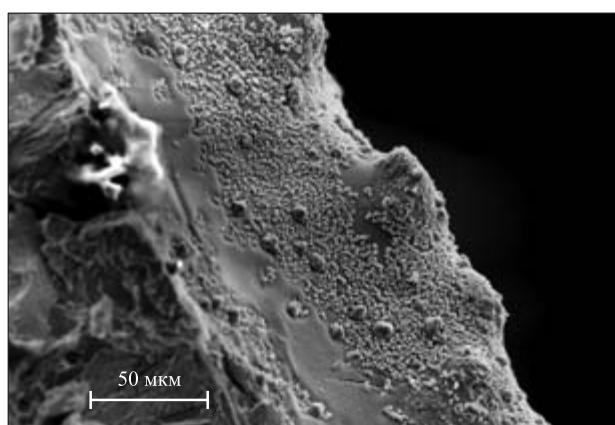


Рис. 8. Поверхность кратера кабельного наконечника провода массы при увеличении $500\times$

частицы состоят практически из Zn (79,8–61,8 %), в то время как ровная поверхность — это фактически латунь (сплав меди с цинком).

В работе [11] отмечается, что одним из отрицательных факторов, сопутствующих электродуговой сварке латуни, является интенсивное испарение цинка из зоны сварного шва. Кстати, точно такое же явление имеет место и при сварке оцинкованной стали. Авторами [11] показано, что, поскольку короткое замыкание по своей физической природе идентично процессу электродуговой сварки, неизбежно выделение цинка из латуни при коротком замыкании, что и зафиксировано на рис. 7, 8 и в таблице. Таким образом, на фактическом примере доказано, что при протекании процесса короткого замыкания на по-

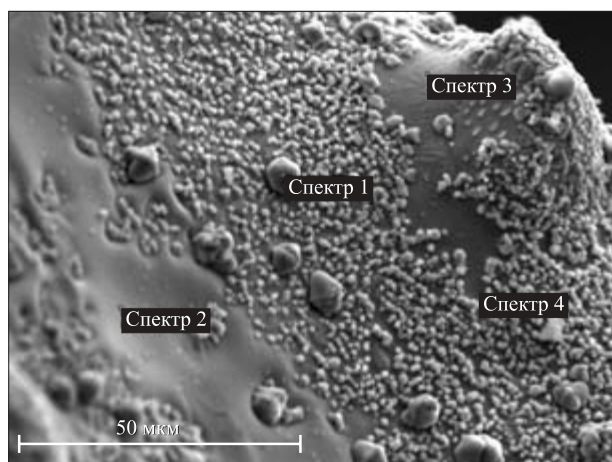


Рис. 9. Вид участка, подвергнутого энергодисперсионному микроанализу

верхности латунного контакта, помимо общих признаков БПС в виде микроплавлений, кратеров и трещин электроэрозии, дополнительно могут фиксироваться выделения цинка в виде шарообразных частиц.

Заключение

В работе [11] приведены результаты эксперимента, в котором получены диагностические признаки, позволяющие идентифицировать процесс разрушения латунного контакта (электродуговой или тепловой). Общеизвестно, что экспериментальное исследование — это наиболее трудоемкий и сложный вид исследования, в котором всегда создается некоторая искусственная (экспериментальная) ситуация, далеко не всегда совпадающая с реальными условиями протекания того или иного физического процесса. Г. И. Рузавин отмечает, что чем больше количество подтверждающих гипотезу свидетельств (фактические данные, результаты экспериментов и т. д.), тем выше ее вероятность.

В настоящей работе на основе фактического исследования ряда автомобилей, сгоревших в процессе пожара, показано, что в реальных условиях пожара на поверхности латунных контактов могут фиксироваться как классические дефекты, характерные для большого переходного сопротивления, в виде кратеров, трещин и микроплавлений, так и сугубо специфичные для латунных контактов выделения цинка в виде шарообразных частиц.

Химический состав шарообразных частиц и поверхности в зоне кратера

Спектр	O	Al	Cr	Mn	Fe	Cu	Zn	Sn
1	4,70	4,84	0	2,00	0,86	7,78	79,81	0
2	6,29	4,08	0	0	1,86	53,42	27,90	6,46
3	8,15	3,21	0	0	1,58	51,59	28,87	6,60
4	15,08	5,25	0,76	2,11	1,54	11,89	61,83	1,54

Настоящим исследованием установлено, что выявленные специфичные для латунных контактов признаки являются устойчивыми и не подвергаются изменениям в естественных условиях хранения термически поврежденного автомобиля (без умышленного уничтожения признаков).

Полученные результаты могут быть использованы при экспертном исследовании латунных кон-

тактов автотранспортных средств, изымаемых с мест пожаров, установлении природы их повреждения и, в конечном счете, причины пожара автомобиля.

В свою очередь, знание технической причины пожара даст возможность разработать профилактические мероприятия и технические решения, направленные на устранение данной причины.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Брушлинский Н. Н., Соколов С. В., Вагнер П.* Человечество и пожары. — М. : ООО “ИПЦ Маска”, 2007. — 142 с.
2. *Богатищев А. И. и др.* Исследование причин возгорания автотранспортных средств : учебное пособие / Под ред. А. И. Колмакова. — М. : ГУ ЭКЦ МВД России, 2003. — 82 с.
3. *Сибирко В. И., Чабан Н. Г., Морозова И. А.* Анализ частоты возникновения пожаров на легковых автомобилях разных марок по причине их неисправности // Пожарная безопасность. — 2014. — № 1. — С. 89–96.
4. Пожары и пожарная безопасность в 2011 году. Статистика пожаров и их последствий : статистический сборник. — М. : МЧС России, 2012.
5. *Severy D., Blaisdell D., Kerkhoff J.* Automotive Collision Fires // SAE Technical Paper No. 741180. — 1974. doi: 10.4271/741180.
6. *Quintiere J. G.* Fundamentals of fire phenomena. — Chichester, West Sussex, England : John Wiley and Sons, Ltd., 2006. — 439 p. doi: 10.1002/0470091150.
7. *Beyler C., Carpenter D., Dinunno P.* Introduction to fire modeling. Fire Protection Handbook. — 20th ed. — Quincy, MA : National Fire Protection Association, 2008.
8. *Okamoto K., Watanabe N., Hagimoto Y., Chigira T., Masano R., Miura H., Ochiai S., Satoh H., Tamura Y., Hayano K., Maeda Y., Suzuki J.* Burning behavior of sedan passenger cars // Safety Journal. — 2009. — No. 44. — P. 301–310. doi: 10.1016/j.firesaf.2008.07.001.
9. *Чешко И. Д.* Экспертиза пожаров (объекты, методы, методики исследования). — СПб. : СПБНИИПБ МВД России, 1997. — 562 с.
10. Судебная экспертиза: типичные ошибки / Под. ред. Е. Р. Россинской. — М. : Проспект, 2014. — 544 с.
11. *Мокряк А. Ю., Чешко И. Д.* Дифференциация следов электродуговых процессов и внешнего теплового воздействия при экспертном исследовании после пожара латунных изделий. Морфологический и элементный анализ // Пожарная безопасность. — 2014. — № 1. — С. 37–42.
12. *Мокряк А. Ю., Чешко И. Д.* Дифференциация следов электродуговых процессов и внешнего теплового воздействия при экспертном исследовании после пожара латунных изделий. Металлографический анализ // Пожарная безопасность. — 2011. — № 1. — С. 107–113.
13. Экспертное исследование после пожара контактных узлов электрооборудования в целях выявления признаков больших переходных сопротивлений : методические рекомендации. — М. : ФГУ ВНИИПО, 2008. — 29 с.
14. *Галишев М. А., Кондратьев С. А., Чешко И. Д., Шарапов С. В., Воронова В. Б.* Руководство к практическим и лабораторным занятиям по расследованию и экспертизе пожаров : учебное пособие. — СПб. : Санкт-Петербургский университет ГПС МЧС России, 2003. — 110 с.

Материал поступил в редакцию 20 марта 2015 г.

English

EXPERT RESEARCH OF AUTOMOBILE BRASS CABLE LUG WIRE WEIGHT

NEDOBITKOV A. I., Candidate of Technical Sciences, Associate Professor,
Department of Informatics and Mathematics, Kazakh Humanitarian Law
Innovative University (Astana St., 48, Ust-Kamenogorsk, 070014, Kazakhstan;
e-mail address: a.nedobitkov@mail.ru)

ABSTRACT

Contained in article fire statistics shows that today the main cause of ignition of cars is the failure of its systems, mechanisms and units. Wherein, the proportion of the number of fires due to a technical failure increased from 15.7 % in 2001 to 34.0 % in 2010. And in 2012 the total number of fires that have occurred due to a malfunction of systems, mechanisms and units of the vehicle and the vehicle wiring fault is equal to 7718 (40.0 %), 25 % higher than the number of fire for the same reason in 2011.

Thus, the development of measures to prevent fire on a vehicle is essential. One of the types of preventive measures is fire investigation.

The article indicates that the overwhelming number of fire engineering conclusions regarding the technical reasons of fire in vehicles are likely that does not allow to implement and design specific engineering solutions. This can be explained by many factors, including the lack of evidence-based practices. In particular, methods of analysis of the reflow of live products from brass in forensic fire technical expertise are not available, although the need for expert research of brass contacts is very high.

The article gives examples of actual research of brass cable lug wire weight for Lada RSO 15L-02U-41, Lada KS0Y5-02D-42, Lada 21144 cars, completely burnt in the fire.

To conduct the study a scanning electron microscope JSM-6392LV was used with energy dispersive microanalysis system INCAEnergy.

In the course of the study there were confirmed and specified on the actual examples of diagnostic features, experimentally determined by specialists of the Research Center of Expertise Fires (All-Russian Research Institute for Fire Protection of Emercom of Russia), and the identity of the process of destruction of the brass contact-electric or thermal.

It is proved that on the surface of the brass contacts there can be fixed as the classic signs of a large transient resistance and highly specific for brass contacts signs in the form of separation of zinc in the form of spherical particles.

It has been established that the identified signs are stable and unaffected in the natural conditions of storage of thermally damaged car. The given data may be used by specialists with expert study of brass contacts vehicles, seized from fire, establishing the nature of their damages and, ultimately, cause of the fire. In addition the materials contained in the article can be useful to the manufacturer Lada RSO 15L-02U-41, Lada KS0Y5-02D-42, Lada 21144 in preventing fires by improving technological discipline and improvement of the design of the contact nodes.

Keywords: short circuit; large contact resistance; zinc; brass; scanning electron microscopy; lug wire weight; diagnostic sign; fire investigation.

REFERENCES

1. Brushlinsky N. N., Sokolov S. V., Wagner P. *Chelovechestvo i pozhary* [Humanity and fires]. Moscow, IPTs Maska Ltd. Publ., 2007. 142 p.
2. Bogatishchev A. I. et al. *Issledovaniye prichin vozgoraniya avtotransportnykh sredstv. Uchebnoye posobiye*. Kolmakov A. I. (ed.) [Research into the causes of fire vehicles. Kolmakov A. I. (ed.)]. Moscow, GU EKTs MVD of Russia Publ., 2003. 82 p.
3. Sibirko V. I., Chaban N. G., Morozova I. A. *Analiz chastoty vozniknoveniya pozharov na legkovykh avtomobilyakh raznykh marok po prichine ikh neispravnosti* [Analysis of the frequency of fire in cars of different brands because of their failure]. *Pozharnaya bezopasnost — Fire Safety*, 2014. no. 1, pp. 89–96.
4. *Pozhary i pozharnaya bezopasnost v 2011 godu. Statistika pozharov i ikh posledstviya. Statisticheskii sbornik* [Fires and fire safety in the 2011. Statistics of fires and their impacts. Statistical Yearbook]. Moscow, All-Russian Research Institute for Fire Protection Publ., 2012.
5. Severy D., Blaisdell D., Kerkhoff J. *Automotive Collision Fires*. SAE Technical Paper, no. 741180, 1974. doi: 10.4271/741180.
6. Quintiere J. G. *Fundamentals of fire phenomena*. Chichester, West Sussex, England, John Wiley and Sons, Ltd., 2006. 439 p. doi: 10.1002/0470091150.
7. Beyler C., Carpenter D., Dinunno P. *Introduction to fire modeling. Fire Protection Handbook*. 20th Edition. National Fire Protection Association, Quincy, MA, 2008.
8. Okamoto K., Watanabe N., Hagimoto Y., Chigira T., Masano R., Miura H., Ochiai S., Satoh H., Tamura Y., Hayano K., Maeda Y., Suzuki J. Burning behavior of sedan passenger cars. *Safety Journal*, 2009, no. 44, pp. 301–310. doi: 10.1016/j.firesaf.2008.07.001.

9. Cheshko I. D. *Expertiza pozharov (obyekty, metody, metodiki issledovaniya)* [Examination of fire (objects, methods, research techniques)]. Saint Petersburg, Saint Petersburg Institute of Fire Safety of Ministry of the Interior of Russia Publ., 1997. 562 p.
10. Rossinskaya E. R. (ed). *Sudebnaya ekspertiza: tipichnyye oshibki* [Judicial examination: typical mistakes]. Moscow, Prospekt Publ., 2014. 544 p.
11. Mokryak A. Yu., Cheshko I. D. Differentsiatsiya sledov elektrodugovykh protsessov i vneshnego teplovogo vozdeystviya pri ekspertnom issledovanii posle pozhara latunnykh izdeliy. Morfologicheskii i elementnyy analiz [Differentiation of traces of electric processes and external heat exposure with expert study after brass products fire. Morphology and elemental analysis]. *Pozharnaya bezopasnost — Fire Safety*, 2014, no. 1, pp. 37–42.
12. Mokryak A. Yu., Cheshko I. D. Differentsiatsiya sledov elektrodugovykh protsessov i vneshnego teplovogo vozdeystviya pri ekspertnom issledovanii posle pozhara latunnykh izdeliy. Metallograficheskii analiz [Differentiation of traces of electric processes and external heat exposure with expert study after brass products fire. Metallographic analysis]. *Pozharnaya bezopasnost — Fire Safety*, 2011, no. 1, pp. 107–113.
13. *Ekspertnoye issledovaniye posle pozhara kontaktnykh uzlov elektrooborudovaniya v tselyakh vyyavleniya priznakov bolshikh perekhodnykh soprotivleniy. Metodicheskiye rekomendatsii* [Expert research after the fire of electrical contact nodes in order to detect signs of high resistances. Methodical recommendations]. Moscow, All-Russian Research Institute for Fire Protection Publ., 2008. 29 p.
14. Galishev M. A., Kondratyev S. A., Cheshko I. D., Sharapov S. V., Voronova V. B. *Rukovodstvo k prakticheskim i laboratornym zanyatiyam po rassledovaniyu i ekspertize pozharov* [Guide to practical and laboratory studies to investigate and expertise fires]. Saint Petersburg, Saint Petersburg University of State Fire Service of Emercom of Russia Publ., 2003. 110 p.



Издательство «ПОЖНАУКА»

Предлагает книгу

Д. А. Корольченко, В. Ю. Громовой
ОГНЕТУШИТЕЛИ.

УСТРОЙСТВО. ВЫБОР. ПРИМЕНЕНИЕ



В учебном пособии приведены классификация огнетушителей и конструкции основных их типов, средства тушения, используемые для зарядки огнетушителей, виды огнетушителей и правила их применения для ликвидации загораний различных веществ, рекомендации по расчету необходимого количества огнетушителей для разных объектов, по их размещению, хранению и техническому обслуживанию.

Рекомендации, содержащиеся в книге, разработаны на основе современных нормативных документов, регламентирующих конструкцию, условия применения, правила эксплуатации и технического обслуживания огнетушителей.

Учебное пособие рассчитано на широкий круг читателей: инженерно-технических работников предприятий и организаций, ответственных за оснащение объектов огнетушителями, поддержание их в работоспособном состоянии и своевременную перезарядку; преподавателей курсов пожарно-технического минимума и дисциплины «Основы безопасности жизнедеятельности» в средних и высших учебных заведениях; частных лиц, выбирающих огнетушитель для обеспечения безопасности квартиры, дачи или автомобиля.

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

А. И. КУПЦОВ, аспирант кафедры промышленной безопасности, Казанский национальный исследовательский технологический университет (Россия, 420015, г. Казань, ул. К. Маркса, 68; e-mail: artpb@yandex.ru)

Р. Р. АКБЕРОВ, канд. техн. наук, доцент кафедры промышленной безопасности, Казанский национальный исследовательский технологический университет (Россия, 420015, г. Казань, ул. К. Маркса, 68)

Ф. М. ГИМРАНОВ, д-р техн. наук, профессор, заведующий кафедрой промышленной безопасности, Казанский национальный исследовательский технологический университет (Россия, 420015, г. Казань, ул. К. Маркса, 68)

УДК 614.838.5

РАСЧЕТ ДЛИТЕЛЬНОСТИ ОПОРОЖНЕНИЯ ТЕХНОЛОГИЧЕСКОГО ОБОРУДОВАНИЯ ЧЕРЕЗ СВЕЧИ СБРОСА

Приведено описание параметров и условий процесса сброса опасного газа со свечи при критическом и некритическом истечении газа в зависимости от времени. Указано два альтернативных способа нахождения времени опорожнения. Определены различия между ними. Показано, что причиной расхождения получаемых разными методами значений является изменение во времени температуры газа в оборудовании. Проведен анализ процесса сброса при некритическом и критическом истечении газа. Получены зависимости, которые могут использоваться при численном моделировании сброса со свечи.

Ключевые слова: опорожнение оборудования; свеча сброса; истечение газа; длительность истечения; граничные условия.

Для опорожнения емкостных аппаратов и трубопроводов в случае остановок технологических систем на ремонт или аварийной ситуации, когда требуется незамедлительно освободить оборудование от обращающихся в нем газов, используются технологические свечи, обеспечивающие стравливание газа в окружающую среду. Как правило, в целях безопасности такие свечи размещаются с подветренной стороны за пределами промышленных площадок предприятия. Однако анализ недавних аварий [1, 2] и результаты экспериментов [3] показывают, что существует вероятность того, что при определенных обстоятельствах, например из-за метеоусловий, шлейф газовой смеси может достигнуть мест расположения технологических установок или других промышленных объектов и привести к образованию опасной загазованности на территории предприятия с концентрациями, превышающими предельно допустимые значения или нижний концентрационный предел распространения пламени.

В настоящее время расчеты концентраций сбрасываемого газа при известных параметрах конструкции свечи (высота выброса, диаметр оголовка свечи) осуществляются по нормативной методике ОНД-86 [4] и методике, приведенной в “Руководстве по безопасности факельных систем” [5]. Однако в этих методиках используются допущения, которые

существенно ограничивают их применимость, поэтому рассчитанные по ним значения могут значительно отличаться от действительных [6]. В отличие от указанных методик численное моделирование позволяет получать реальную картину рассеивания газов при выбросах со свеч с учетом рельефа и характера застройки местности и атмосферной устойчивости [1–3].

Известно, что при численном моделировании достаточно сложно задать весь комплекс граничных и начальных условий [6–9]. В целях адекватного расчета распространения газовой смеси в приземном слое важно, в первую очередь, корректно заложить параметры и условия сброса со свечи — скорость, давление, температуру, плотность и сжимаемость сбрасываемого газа на выходе из свечи, а также образующийся эффект дросселирования, когда давление газа резко понижается до давления окружающей среды. Так как процессы стравливания газа нестационарные, параметры и условия сброса должны рассматриваться как функции от времени. В конечном счете это позволило бы определить длительность времени опорожнения технологического оборудования, что само по себе является важной задачей для специалистов эксплуатирующих организаций.

Таким образом, целью данной статьи являлось определение расчета длительности опорожнения технологического оборудования через свечи сброса.

Процессы истечения газа при относительно высоких давлениях могут рассматриваться как адиабатические, т. е. протекающие без внешнего теплообмена со средой при одновременном изменении давления, температуры и объема газа.

Известно, что скорость газа w_t (м/с), сбрасываемого со свечи, определяется формулой Сен-Венана – Венцеля в предположении, что площадь поперечного сечения свечи существенно меньше площади сечения оборудования, из которого сбрасывается газ:

$$w_t = \varphi \sqrt{\frac{2k}{k-1} \frac{P_1}{\rho_1} \left[1 - \beta^{\frac{k-1}{k}} \right]}, \quad (1)$$

где φ — коэффициент гидравлического сопротивления; для идеального газа (при отсутствии потерь) $\varphi = 1$; для реального газа $\varphi = 0,8 \div 0,9$ [10];

k — показатель адиабаты;

P_1 — давление газа в оборудовании, Па;

ρ_1 — плотность газа в оборудовании, кг/м³;

β — отношение давлений в атмосфере P_2 и в оборудовании P_1 ; $\beta = P_2/P_1$.

Формулу (1) можно представить через уравнение Майера $C_p = kR/(k-1)$ и классическое уравнение Менделеева – Клапейрона в следующем виде:

$$w_t = \varphi \sqrt{2 \frac{C_p T_1}{\mu} \left[1 - \beta^{\frac{k-1}{k}} \right]}, \quad (2)$$

где C_p — молярная теплоемкость при постоянном давлении;

R — универсальная газовая постоянная, Дж/(моль·К);

μ — молярная масса газа, кг/моль;

T_1 — температура газа в оборудовании, К.

По мере увеличения перепада давлений β скорость газа w_t увеличивается лишь до максимальной, которая приблизительно равна скорости звука в данной среде. Критическое отношение давлений $\beta_{кр}$, соответствующее максимальной критической скорости истечения газа со свечи, определяется следующим образом:

$$\beta_{кр} = \left(\frac{P_2}{P_1} \right)_{кр} = \left(\frac{2}{k+1} \right)^{k/(k-1)}. \quad (3)$$

Однако при повышении давления P_1 выше сверхкритического значения действительная скорость истечения возрастать не будет. Следовательно, при расчете истечения в формулу (1) подставляют:

- в случае критического истечения ($P_2/P_1 \leq \beta_{кр}$):

$$\beta = \left(\frac{2}{k+1} \right)^{k/(k-1)}; \quad (4)$$

- в случае некритического истечения ($P_2/P_1 > \beta_{кр}$):

$$\beta = P_2/P_1. \quad (5)$$

Таким образом, критическая скорость истечения газа на выходе из свечи будет примерно равна местной скорости звука и может быть представлена в виде:

$$\begin{aligned} w_t = w_{кр} &= \varphi \sqrt{\frac{2k}{k+1} \frac{P_1}{\rho_1}} = \varphi \sqrt{\frac{2k}{k+1} \frac{RT_1}{\mu}} = \\ &= \varphi \sqrt{2 \frac{C_p T_1}{\mu} \frac{k-1}{k+1}}. \end{aligned} \quad (6)$$

Сброс газа через свечу так или иначе связан с изменением исходного состояния среды в опорожняемом оборудовании вследствие убывания газа.

Закон изменения (убывания) общей массы газа m (кг) в оборудовании в рассматриваемом объеме за счет выхода газа через свечу, имеющую площадь поперечного сечения s [11], имеет вид:

$$\frac{dm}{dt} = -\rho_2 w_t s, \quad (7)$$

где ρ_2 — плотность газа при адиабатическом истечении;

$$\rho_2 = \rho_1 (\beta)^{1/k}. \quad (8)$$

Тогда с учетом формулы (1) для скорости газа на выходе из свечи закон изменения массы газа примет вид:

$$\frac{dm}{dt} = -\frac{m}{V} (\beta)^{1/k} \varphi \sqrt{2 \frac{C_p T_1}{\mu} \left[1 - \beta^{\frac{k-1}{k}} \right]} s, \quad (9)$$

где V — объем газа в оборудовании, м³.

Полное время опорожнения массы газа τ_m может быть определено из соотношения

$$\begin{aligned} \frac{1}{\tau_m} &= \left(\frac{1}{m} \left| \frac{dm}{dt} \right| \right)_{t=0} = \\ &= \frac{1}{V} (\beta)^{1/k} \varphi \sqrt{2 \frac{C_p T_1}{\mu} \left[1 - \beta^{\frac{k-1}{k}} \right]} s. \end{aligned} \quad (10)$$

Время, за которое начальное давление в оборудовании сравнивается с давлением окружающей среды, находится через уравнение изменения полной энергии газа E внутри рассматриваемого объема оборудования:

$$\frac{dE}{dt} = - \left(\frac{\rho_2 w_t^2}{2} + \frac{\rho_2 C_p T_2}{\mu} \right) w_t s, \quad (11)$$

где $(\rho_2 w_t^2)/2 + \rho_2 C_p T_2/\mu$ — плотность энергии газа (количество энергии, отнесенной к единице объема) вблизи отверстия свечи;

$\rho_2 w_t^2/2$ — плотность кинетической энергии, связанной с перемещением газа;

$\rho_2 C_p T_2/\mu$ — плотность внутренней энергии газа;

C_V — молярная теплоемкость при постоянном объеме;

T_2 — температура на оголовке свечи.

Полная энергия сбрасываемого газа E в рассматриваемом объеме оборудования связана с давлением газа P (зависящим от времени) и объемом V (постоянной величиной) соотношением

$$E = \frac{C_V}{R} PV, \quad (12)$$

откуда получаем $\frac{dE}{dt} = \frac{C_V}{R} V \frac{dP}{dt}$ и уравнение изменения давления:

$$\begin{aligned} \frac{C_V}{R} V \frac{dP}{dt} = & -\rho_2 \left(\varphi^2 \frac{C_P T_1}{\mu} \left[1 - \beta^{\frac{k-1}{k}} \right] + \frac{C_V T_2}{\mu} \right) \times \\ & \times \varphi \sqrt{2 \frac{C_P T_1}{\mu} \left[1 - \beta^{\frac{k-1}{k}} \right]} s. \end{aligned} \quad (13)$$

Тогда с учетом уравнения для плотности (8) и того факта, что температура на выходе из свечи

$$T_2 = T_1 (\beta)^{(k-1)/k}, \quad (14)$$

зависимость приобретает вид:

$$\begin{aligned} \frac{C_V}{R} V \frac{dP}{dt} = & -\rho_1 (\beta)^{1/k} \left(\varphi^2 \frac{C_P T_1}{\mu} \left[1 - \beta^{\frac{k-1}{k}} \right] + \right. \\ & \left. + \frac{C_V T_1}{\mu} (\beta)^{\frac{k-1}{k}} \right) \varphi \sqrt{2 \frac{C_P T_1}{\mu} \left[1 - \beta^{\frac{k-1}{k}} \right]} s. \end{aligned} \quad (15)$$

Введя понятие “скорости истечения газа в вакуум” $w_{\text{вак}}(T_1) = \sqrt{2(C_P T_1)/\mu}$ и используя уравнение Менделеева – Клапейрона, получим:

$$\begin{aligned} \frac{1}{P_1} \frac{dP}{dt} = & -\frac{s w_{\text{вак}}(T_1)}{C_V V} (\beta)^{1/k} \times \\ & \left(\varphi^2 C_P \left[1 - \beta^{\frac{k-1}{k}} \right] + C_V (\beta)^{\frac{k-1}{k}} \right) \varphi \sqrt{\left[1 - \beta^{\frac{k-1}{k}} \right]}. \end{aligned} \quad (16)$$

В свою очередь оценку времени сброса давления τ_P можно найти по формуле

$$\begin{aligned} \frac{1}{\tau_P} = & \left(\frac{1}{P_1} \left| \frac{dP}{dt} \right| \right)_{t=0} = \frac{s w_{\text{вак}}(T_1)}{V} (\beta)^{1/k} \times \\ & \times \left(\varphi^2 k \left[1 - \beta^{\frac{k-1}{k}} \right] + (\beta)^{\frac{k-1}{k}} \right) \varphi \sqrt{\left[1 - \beta^{\frac{k-1}{k}} \right]}. \end{aligned} \quad (17)$$

Рассмотрим критическое отношение давлений $\beta_{\text{кр}}$ при сбросе газа со свечи. В этом случае параметры состояния газа на выходе из свечи могут быть выражены через так называемые параметры “заторможенного потока”, т. е. через параметры в оборудовании, являющиеся функциями от времени. Пренебрегая скоростью перемещения газа в оборудовании

в сторону сбросной свечи по сравнению со скоростью газа в выходном отверстии свечи, получим:

$$\rho_{\text{кр}} = \rho_1(t) \left(\frac{2}{k+1} \right)^{1/(k-1)}; \quad (18)$$

$$T_{\text{кр}} = T_1(t) \left(\frac{2}{k+1} \right); \quad (19)$$

$$P_{\text{кр}} = P_1(t) \left(\frac{2}{k+1} \right)^{k/(k-1)} > P_2. \quad (20)$$

Тогда с учетом формул (6), (7), (11), (18)–(20) получаем следующие оценки времени при опорожнении оборудования через критическую скорость:

$$\begin{aligned} \frac{1}{\tau_m} = & \left(\frac{1}{m} \left| \frac{dm}{dt} \right| \right)_{t=0} = \frac{1}{V} \left(\frac{2}{k+1} \right)^{1/(k-1)} \times \\ & \times \varphi \sqrt{2 \frac{C_P T_1}{\mu} \frac{k-1}{k+1}} s; \end{aligned} \quad (21)$$

$$\begin{aligned} \frac{1}{\tau_P} = & \left(\frac{1}{P_1} \left| \frac{dP}{dt} \right| \right)_{t=0} = \frac{s w_{\text{вак}}(T_1)}{V} \left(\frac{2}{k+1} \right)^{1/(k-1)} \times \\ & \times \left(\frac{\varphi^2 k(k-1) + 2}{k+1} \right) \varphi \sqrt{\frac{k-1}{k+1}}. \end{aligned} \quad (22)$$

Формулы (21) и (22) принимаются с допущением, что время до перехода критического истечения в некритическое ($P_2/P_1 > \beta_{\text{кр}}$) намного больше интервала времени от перехода в некритическое истечение до полного окончания сброса.

На основе формул (10), (17), (21) и (22) проведен анализ процесса сброса при некритическом и критическом истечении газа.

Из таблицы следует, что времена опорожнения, которые находятся через убыль массы газа (τ_m) или через снижение давления (τ_P) в оборудовании, примерно равны (отличие составляет примерно 1–2 %). Причина расхождения состоит в том, что температура газа в оборудовании также изменяется со временем. При этом нельзя предполагать, что она всегда успевает сравняться с температурой окружающей среды, так как процесс сброса может идти непродолжительное время. Ясно, что за такое малое время температура газа в объеме оборудования не успевает сравняться с температурой окружающей среды за счет теплообмена с ней через стенки оборудования. Тем не менее значения времени могут быть уточнены, если, например, уравнения (10), (17), (21) и (22) будут решены численно [11]. Погрешность расчетов будет снижаться с уменьшением числа Маха при докритической скорости [12].

Анализ также показал, что разница между временами опорожнения, определяемыми через уменьшение массы газа и сброс давления, инвариантна при изменениях диаметра свечи, температуры в оборудовании и объема последнего. Таким образом, мож-

Расчетные данные при некротическом и критическом отношении давлений

Газ	P_1 , МПа	ϕ	V_1 , м ³	T_1 , К	Диаметр свечи d , м	τ_m , с	τ_p , с
Ацетилен	0,14/4	0,9/0,9	100/200	293/273	0,3/0,3	8,23/15,82	8,18/15,64
Метан	0,14/4	0,9/0,9	100/200	293/273	0,3/0,3	6,46/12,41	6,42/12,27
Воздух	0,14/4	0,9/0,9	100/200	293/273	0,3/0,3	8,62/16,42	8,51/16,06

Примечание. Над чертой приведены данные для докритического отношения давлений, под чертой — для критического.

но использовать разные способы нахождения времени опорожнения в зависимости от постановки задачи. При численном моделировании сброса со свечи появляется возможность выбора типа граничного начального условия на оголовке свечи заданием давления, или массового расхода, или скорости потока газа в зависимости от времени.

Выводы

Приведенное математическое описание основных параметров и условий процессов сброса опасных газов из технологического оборудования с учетом их нестационарности позволило получить уравнения для определения длительности истечения газа из оборудования до его полного опорожнения в случаях докритической и критической скоростей истечения.

Предложенные два метода определения времени опорожнения оборудования через уменьшение массы газа (τ_m) и сброс давления (τ_p) дают расхождения в результатах порядка 1–2 %.

Полученные аналитические зависимости позволяют определить параметры потока у оголовка свечи (давление, массовый расход, температура, плотность, скорость) в зависимости от времени. Использование этих зависимостей в качестве граничных условий при расчете сброса в таких программных комплексах, как Fluent [1, 6], позволяет адекватно рассчитать процесс распространения газозвушной смеси в приземном слое атмосферы при стравливании опасных газов из промышленного емкостного оборудования в случае остановок технологических систем на ремонт или при возникновении внештатных аварийных ситуаций.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Купцов А. И., Гимранов Ф. М. Численное моделирование сброса газов через свечу рассеивания на газотранспортных и газоперерабатывающих объектах // Журнал экологии и промышленной безопасности. — 2013. — Т. 59, № 3. — С. 16–17.
2. Завгороднев А. В., Мельников А. В., Сафонов В. С. Проблема обеспечения безопасности сброса газа в атмосферу на объектах транспортирования и хранения природного газа // Безопасность труда в промышленности. — 2011. — № 11. — С. 66–71.
3. Завгороднев А. В., Аконова Г. С., Толстова Н. С., Мельников А. В. Результаты исследований рассеивания в атмосфере организованных нестационарных выбросов газа на объектах газотранспортных предприятий // Территория Нефтегаз. — 2011. — № 12. — С. 90–97.
4. ОНД–86. Методика расчета концентраций в атмосферном воздухе вредных веществ, содержащихся в выбросах предприятий : утв. председателем Госкомгидромета 04.08.1986 № 192; введ. 01.01.1987. — Л. : Гидрометеиздат, 1987.
5. Руководство по безопасности факельных систем: утв. приказом Ростехнадзора от 26.12.2012 № 779 // Нормативные документы в сфере деятельности Федеральной службы по экологическому, технологическому и атомному надзору. — 2013. — Сер. 03, вып. 68. URL : www.normacs.ru (дата обращения: 01.04.2015).
6. Купцов А. И., Акберов Р. Р., Исламхузин Д. Я., Гимранов Ф. М. Проблемы расчета рассеивания легких газов в атмосфере при их выбросах со свечи с учетом рельефа и застройки местности и атмосферной устойчивости // Вестник Казанского технологического университета. — 2014. — Т. 17, № 6. — С. 284–286.
7. Richards P. J., Hoxey R. P. Appropriate boundary conditions for computational wind engineering models using the $k-\epsilon$ turbulence model // Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics. — 1993. — No. 46–47. — P. 145–153. doi: 10.1016/0167-6105(93)90124-7.
8. Blocken B., Carmeliet J. The influence of the wind-blocking effect by a building on its wind-driven rain exposure // Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics. — 2006. — Vol. 94, No. 2. — P. 101–127. doi: 10.1016/j.jweia.2005.11.001.
9. Moonen P., Blocken B., Roels S., Carmeliet J. Numerical modeling of the flow conditions in a closed-circuit low-speed wind tunnel // Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics. — 2006. — Vol. 94, No. 10. — P. 699–723. doi: 10.1016/j.jweia.2006.02.001.

10. Идельчик И. Е. Справочник по гидравлическим сопротивлениям / Под ред. М. О. Штейнберга. — М. : Машиностроение, 1992. — 672 с.
11. Лукьянов А. А. Оценка времени сброса давления газа в газопроводе при открывании его в атмосферу посредством свечи // Социальная политика и социология. — 2012. — № 5(83). — С. 227–236.
12. Емцев Б. Т. Техническая гидромеханика : учебник для вузов по специальности “Гидравлические машины и средства автоматики”. — М. : Машиностроение, 1987. — 440 с.

Материал поступил в редакцию 13 апреля 2015 г.

English

CALCULATION OF DURATION OF EMPTYING THE PROCESSING EQUIPMENT THROUGH RELEASE STACKS

KUPTSOV A. I., Postgraduate Student of Department of Industrial Safety, Kazan National Research Technological University (K. Marksa St., 68, Kazan, 420015, Russian Federation; e-mail address: artpb@yandex.ru)

AKBEROV R. R., Candidate of Technical Sciences, Associate Professor of Department of Industrial Safety, Kazan National Research Technological University (K. Marksa St., 68, Kazan, 420015, Russian Federation)

GIMRANOV F. M., Doctor of Technical Sciences, Professor of Department of Industrial Safety, Kazan National Research Technological University (K. Marksa St., 68, Kazan, 420015, Russian Federation)

ABSTRACT

The proposed mathematical description of the key parameters and conditions of the processes of emptying the processing equipment by releasing dangerous gases from it with the account of non-stationarity of the processes allowed to obtain equations for determination of duration of the gas efflux from the equipment before its full emptying in cases of subcritical and critical efflux velocities.

The proposed two methods of determining the time of emptying the equipment, through reducing mass of the gas (τ_m) and through pressure dumping (τ_p), give divergences in the results about 1–2 %.

The obtained analytical dependences allow determining flow parameters at the stack tip (pressure, mass flow rate, temperature, density, speed) depending on time. The use of these dependences as boundary conditions for calculation of gas releases in such software packages as Fluent [1, 6], allows for adequate calculating the process of propagation of the air-gas mixture in the atmospheric surface layer at releasing dangerous gases from the industrial tanks and vessels in cases of shutdowns of technological systems for repairs or at emergencies.

Keywords: emptying the equipment; release stack; gas efflux; efflux duration; boundary conditions.

REFERENCES

1. Kuptsov A. I., Gimranov F. M. Chislennoye modelirovaniye sbrosa gazov cherez svechu rasseivaniya na gazotransportnykh i gazopererabatyvayushchikh ob'yektakh [Numerical simulation of gas releases through stacks at gas transmission and refining facilities]. *Zhurnal ekologii i promyshlennoy bezopasnosti* — *Journal of Ecology and Industrial Safety*, 2013, vol. 59, no. 3, pp. 16–17.
2. Zavgorodnev A. V., Melnikov A. V., Safonov V. S. Problema obespecheniya bezopasnosti sbrosa gaza v atmosferu na ob'yektakh transportirovaniya i khraneniya prirodnogo gaza [The problem of ensuring safety of gas discharge to the atmosphere at the facilities of natural gas transportation and storage]. *Bezopasnost truda v promyshlennosti* — *Occupational Safety in the Industry*, 2011, no. 11, pp. 66–71.
3. Zavgorodnev A. V., Akopova G. S., Melnikov A. V. Rezultaty issledovaniy rasseivaniya v atmosfere organizovannykh nestatsionarnykh vybrosov gaza na ob'yektakh gazotransportnykh predpriyatiy [Results of investigation of dispersion of organized nonstationary gas emissions into the atmosphere at gas transmission enterprises]. *Territoriya Neftegaz* — *Oil And Gas Territory*, 2011, no. 12, pp. 90–97.
4. OND-86. The method for calculation of concentrations of harmful substances, contained in the releases of enterprises into atmospheric air: approved by the chairman of the USSR's national committee on hydrometeorology and environmental control on 4 August 1986, No. 192 (in Russian).

5. Safety guidelines for flaring systems: approved by the order of Russia's Rostekhnadzor on 12 December 2012, No. 779. Normative documents in the field of activity of the Federal Service for Environmental, Technological, and Nuclear Supervision, 2013, series 03, issue 68. Available at: www.normacs.ru (Accessed 1 April 2015) (in Russian).
6. Kuptsov A. I., Akberov R. R., Islamkhuzin D. Ya., Gimranov F. M. Problemy rascheta rasseivaniya legkikh gazov v atmosfere pri ikh vybrosakh so svechi s uchetom relyefa i zastroyki mestnosti i atmosferno yustoychivosti [Problems of calculation of dispersion of light gases in the atmosphere at their emissions from stacks with account for surface topography, buildings terrain and atmospheric stability]. *Vestnik Kazanskogo tekhnologicheskogo universiteta — Herald of Kazan Technological University*, 2014, vol. 17, no. 6, pp. 284–286.
7. Richards P. J., Hoxey R. P. Appropriate boundary conditions for computational wind engineering models using the k–turbulence model. *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, 1993, no. 46–47, pp. 145–153. doi: 10.1016/0167-6105(93)90124-7.
8. Blocken B., Carmeliet J. The influence of the wind-blocking effect by a building on its wind-driven rain exposure. *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, 2006, vol. 94, no. 2, pp. 101–127. doi: 10.1016/j.jweia.2005.11.001.
9. Moonen P., Blocken B., Roels S., Carmeliet J. Numerical modeling of the flow conditions in a closed-circuit low-speed wind tunnel. *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, 2006, vol. 94, no. 10, pp. 699–723. doi: 10.1016/j.jweia.2006.02.001.
10. Idelchik I. E. *Spravochnik po gidravlicheskim soprotivleniyam* [Handbook of hydraulic resistance]. M. O. Shteynberg (ed.). Moscow, Mashinostroyeniye Publ., 1992. 672 p.
11. Lukyanov A. A. Otsenka vremeni sbrosa davleniya gaza v gazoprovode pri otkryvanii yego v atmosferu posredstvom svechi [Assessment of the time of releasing gas pressure from the gas pipeline in case it is opened to the atmosphere by means of a stack]. *Sotsialnaya politika i sotsiologiya — Social Policy and Sociology*, 2012, no. 5 (83), pp. 227–236.
12. Emtsev B. T. *Tekhnicheskaya gidromekhanika. Uchebnik dlya vuzov po spetsialnosti "Gidravlicheskiye mashiny i sredstva avtomatiki"* [Engineering fluid dynamics: Textbook for students of institutions of higher education majoring in "Hydraulic machines and automatic equipment means"]. Moscow, Mashinostroyeniye Publ., 1987. 440 p.



Издательство «ПОЖНАУКА»

Предлагает книгу

А. А. Антоненко, Т. А. Буцынская, А. Н. Членов.
ОСНОВЫ ЭКСПЛУАТАЦИИ СИСТЕМ КОМПЛЕКСНОГО ОБЕСПЕЧЕНИЯ
БЕЗОПАСНОСТИ ОБЪЕКТОВ : учебно-справочное пособие
 / Под общ. ред. д-ра техн. наук А. Н. Членова



В учебно-справочном пособии изложены основы современного подхода к проблеме комплексного обеспечения безопасности объектов хозяйствования с помощью технических средств и систем; приведены сведения о технической эксплуатации комплексных систем безопасности, а также справочно-методическая информация для решения практических задач по эксплуатации. Дано основное содержание эксклюзивной разработки — ГОСТ Р 53704–2009 «Системы безопасности комплексные и интегрированные», входящего в отраслевой комплект нормативно-технической документации по данной проблеме.

Книга предназначена для практических работников в области систем безопасности и может быть использована как учебное пособие для подготовки и повышения квалификации специалистов соответствующего профиля.

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

А. И. БЫКОВ, ведущий инженер службы пожарной безопасности,
ООО “Газпром трансгаз Ухта” (Россия, Республика Коми, 169300,
г. Ухта, просп. Ленина, 39/2; e-mail: abykov@sgp.gazprom.ru)

УДК 614.84;658.382

ОПРЕДЕЛЕНИЕ СРЕДНЕЙ ТЕМПЕРАТУРЫ ГАЗА НА АВАРИЙНОМ УЧАСТКЕ МАГИСТРАЛЬНОГО ГАЗОПРОВОДА

Показано, что строгое определение массы газа, находившейся на аварийном участке газопровода до аварии, требует такого же строгого обоснования средней температуры газа на рассматриваемом аварийном участке газопровода. Вычисление средней температуры зависит от ряда параметров, характеризующих состояние газа в условиях его транспортировки и разрыва трубопровода. Существующие методики достаточно сложны и не всегда доступны для текущих инженерных расчетов без специальных программных продуктов. Дано обоснование методики расчета средней температуры газа на примере аварийного разрыва линейной части магистрального газопровода.

Ключевые слова: магистральный газопровод; аварийный участок; масса газа; средняя температура газа; удельная теплоемкость природного газа; коэффициент теплопередачи от газа к грунту.

Расчет массы газа M_r (кг) на аварийных участках магистрального газопровода выполняют по формуле, основанной на уравнении Менделеева – Клапейрона [1]:

$$M_r = VP_{cp} / (R_r T_{cp} K_{сж}), \quad (1)$$

где V — объем газа, заключенного в рассматриваемом участке газопровода до аварии, m^3 ;

P_{cp} — среднее давление газа на рассматриваемом участке, Па;

R_r — удельная газовая постоянная, Дж/(кг·К);

$R_r = R/m_r$;

R — универсальная газовая постоянная;
 $R = 8314$ Дж/(моль·К);

m_r — молярная масса газа, определяемая по атомным массам элементов, входящих в его состав, кг/моль;

T_{cp} — средняя температура газа на рассматриваемом аварийном участке, К;

$K_{сж}$ — коэффициент сжимаемости.

Строгий подход к определению массы газа M_r по формуле (1) требует строгого обоснования подходов к определению и средней температуры газа T_{cp} на аварийных участках газопровода. Решению этой задачи и посвящается настоящая статья.

Обоснование методики выполняется с учетом рекомендаций, изложенных в СТО Газпром 2-2.3-351–2009 [2]. В качестве примера используется расчетная схема, представленная на рисунке. При этом предполагается, что аварийный разрыв магистрального газопровода возникает в середине выбранного участка между двумя соседними компрессорными станциями КС1 и КС2 и образуются два аварийных

участка: 1-й — от КС1 до точки разрыва А; 2-й — от точки разрыва А до КС2. Линейные размеры этих участков указаны на рисунке.

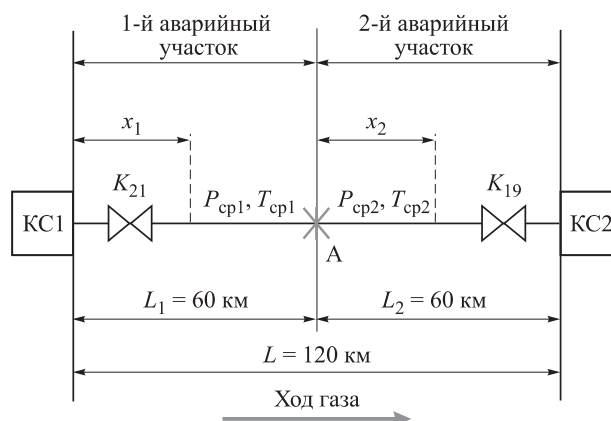
Для расчета взяты следующие исходные данные:

- горючее вещество — природный газ состава: метан CH_4 — 98,5 %; диоксид углерода CO_2 — 0,5 %; азот N_2 — 1,0 %;
- наружный диаметр газопровода $d_n = 1,420$ м;
- давление нагнетания $P_{наг} = 7,5$ МПа;
- температура газа на входе $T_n = 283,15$ К (10 °С);
- температура грунта $T_{гр} = 278,15$ К (5 °С).

В соответствии с методическими указаниями [2] параметр T_{cp} рекомендуется определять по формуле

$$T_{cp} = T_k + (T_n - T_k) \frac{L - x}{L}, \quad (2)$$

где T_n , T_k — температура газа соответственно в начале и конце аварийного участка, К;



Пример расчетной схемы: А — точка разрыва газопровода

L — расстояние между компрессорными станциями, км;

x — длина рассматриваемого аварийного участка до его середины, км.

Однако методика расчета температуры газа в конце участка T_k в [2] не приводится. В действующих нормативных документах (ГОСТ Р 12.3.047–2012 [3], приказы МЧС № 404 и 649 [4], РД 03-409–01 [5] и др.), регламентирующих оценку безопасности производственных объектов, оперирующих с горючими и взрывоопасными веществами, также отсутствуют указания о способах расчета этого параметра. Тем не менее температуру газа в конце аварийного участка можно вычислить по формуле, рекомендованной в [6]:

$$t_k = t_{гр} + \exp \left[\frac{(t_n - t_{гр}) Q \Delta C_p \cdot 10^6}{62,6 K_T d_n L} \right], \quad (3)$$

где t_k — температура газа в конце рассматриваемого участка газопровода, °C, при известных значениях начальной температуры потока t_n (°C) и температуры грунта $t_{гр}$ (°C);

Q — суточная производительность газопровода, млн. м³/сут;

Δ — относительная плотность природного газа;

C_p — удельная теплоемкость природного газа при постоянном давлении, ккал/(кг·°C);

K_T — коэффициент теплопередачи от газа в окружающую среду, ккал/(м²·ч·°C);

d_n — наружный диаметр трубы газопровода, мм.

После преобразования и приведения к системе СИ это выражение примет следующий вид:

$$T_k = T_{гр} + \exp \left[0,0216 \frac{(T_n - T_{гр}) Q_c \Delta C_p}{K_T d_n L} \right], \quad (4)$$

где $T_{гр}$ — температура грунта, К;

Q_c — массовая производительность газопровода в единицу времени, кг/с;

C_p — удельная теплоемкость природного газа при постоянном давлении, Дж/(кг·К);

L — длина рассматриваемого участка, м;

K_T — коэффициент теплопередачи от газа к грунту, Вт/(м²·К).

Начальная температура газа T_n и температура грунта $T_{гр}$ — величины, фактически измеряемые. Для дальнейших рассуждений принимаем: $T_n = 283,15$ К (10 °C); $T_{гр} = 278,15$ К (5 °C).

Остаются неизвестными параметры C_p , K_T , Δ и Q_c .

Удельная теплоемкость C_p для природного газа может быть определена по известной формуле [7]:

$$C_p = k R_T / (k - 1), \quad (5)$$

где k — показатель адиабаты; для чистого метана CH_4 можно принимать $k = 1,315$, поскольку содержа-

ние этого компонента в природном газе превышает 98 %;

R_T — удельная газовая постоянная, Дж/(кг·К); для метана

$$R_{г(CH_4)} = \frac{R}{m_{CH_4}} = \frac{8314}{16,043} = 518,23 \text{ Дж/(кг·К)}; \quad (6)$$

m_{CH_4} — молярная масса метана, которая складывается из атомных масс элементов, входящих в его состав ($C = 12,011$; $H = 1,008$):

$$m_{CH_4} = 12,011 + 1,008 \cdot 4 = 16,043 \text{ кг/моль}. \quad (7)$$

Тогда расчетное значение удельной теплоемкости метана составит:

$$C_{p(CH_4)} = \frac{1,315 \cdot 518,23}{1,315 - 1} = 2163 \text{ Дж/(кг·К)}. \quad (8)$$

Сравнение расчетного значения удельной теплоемкости метана с табличным, равным 2226 Дж/(кг·К) [8], показывает, что погрешность расчета не превышает 3 %.

Для природного газа в соответствии с ГОСТ 30319.1–96 [9] показатель адиабаты определяют по усовершенствованной формуле Кобза:

$$k = 1,556(1 + 0,074x_n) - 3,9 \cdot 10^{-4} T_c (1 - 0,68x_n) - 0,208\rho_c + \left(\frac{P_c}{T_c} \right)^{1,43} \left[384(1 - x_n) \left(\frac{P_c}{T_c} \right)^{0,8} + 26,4x_n \right], \quad (9)$$

где x_n — долевое содержание примесей в природном газе;

ρ_c — плотность газа при стандартных условиях (давление $P_c = 0,1013 \cdot 10^6$ Па и температура $T_c = 293,15$ К (20 °C)), кг/м³.

Проанализируем формулу (9). Если положить здесь $x_n = 0$, то можно вычислить показатель адиабаты для чистого метана k_{CH_4} , стандартная плотность $\rho_{c(CH_4)}$ которого может быть определена в соответствии с [9] по формуле

$$\rho_{c(CH_4)} = m_{CH_4} \frac{P_c}{R T_c Z_c}, \quad (10)$$

где Z_c — фактор сжимаемости, который для природного газа в соответствии с [9] определяется из выражения

$$Z_{c(пр)} = 1 - \left[0,0458 \sum_i (k_i x_i) - 0,0022 + 0,0195x_{N_2} + 0,075x_{CO_2} \right]^2, \quad (11)$$

где k_i — количество атомов углерода в i -м углеводородном компоненте природного газа;

x_i — доля компонента в смеси;

x_{N_2} , x_{CO_2} — доли примесей азота и диоксида углерода в составе природного газа.

В нашем случае количество атомов углерода C k_C в составе углеродного компонента CH_4 равно 1. Доли компонентов в природном газе составляют: метана — $x_{CH_4} = 0,985$; азота — $x_{N_2} = 0,01$; диоксида углерода — $x_{CO_2} = 0,005$. Подставив эти значения в (8), получим:

$$Z_{c(пр)} = 1 - [0,0458 \cdot 1 \cdot 0,985 - 0,0022 + 0,0195 \cdot 0,01 + 0,075 \cdot 0,005]^2 = 0,9981.$$

Тогда стандартная плотность $\rho_{c(CH_4)}$ чистого метана составит:

$$\rho_{c(CH_4)} = \frac{16,043 \cdot 0,1013 \cdot 10^6}{8314 \cdot 293,15 \cdot 0,9981} = 0,668 \text{ кг/м}^3.$$

В этом случае показатель адиабаты для чистого метана будет иметь значение:

$$k_{CH_4} = 1,556 (1 + 0,074 \cdot 0) - 3,9 \cdot 10^{-4} \times \\ \times 293,15(1 - 0,68 \cdot 0) - 0,208 \cdot 0,668 + \\ + (0,1013/293,15)^{1,43} \cdot [384 \cdot (1 - 0) \times \\ \times (0,1013/293,15)^{0,8} + 26,4 \cdot 0] = 1,303,$$

где значение P_c подставляется в МПа; $P_c = 0,1013$ МПа.

Для рассматриваемого природного газа, содержащего 1,0 % N_2 и 0,5 % CO_2 ($x_n = 1,5$ %), молярную массу $m_{пр}$ рассчитывают по формуле

$$m_{пр} = m_{CH_4} x_{CH_4} + m_{CO_2} x_{CO_2} + m_{N_2} x_{N_2}, \quad (12)$$

где m_{CO_2} , m_{N_2} — молярные массы соответственно диоксида углерода и азота, кг/моль.

По аналогии с (7) рассчитаем m_{CO_2} и m_{N_2} :

$$m_{CO_2} = 12,011 + 16,0 \cdot 2 = 44,011 \text{ кг/моль};$$

$$m_{N_2} = 12,001 \cdot 2 = 28,002 \text{ кг/моль}.$$

Подставив полученные значения в (12), с учетом долевого содержания элементов получим:

$$m_{пр} = 16,043 \cdot 0,985 + 44,011 \cdot 0,005 + 28,002 \cdot 0,01 = \\ = 16,302 \text{ кг/моль}.$$

При этом стандартная плотность природного газа по аналогии с (10) составит:

$$\rho_{c(пр)} = m_{пр} \frac{P_c}{R T_c Z_c} = 16,302 \frac{0,1013 \cdot 10^6}{8314 \cdot 293,15 \cdot 0,9981} = \\ = 0,679 \text{ кг/м}^3. \quad (13)$$

Тогда показатель адиабаты для природного газа в соответствии с (9) будет иметь значение:

$$k_{пр} = 1,556 \cdot (1 + 0,074 \cdot 0,015) - 3,9 \cdot 10^{-4} \cdot 283,15 \times \\ \times (1 - 0,68 \cdot 0,015) - 0,208 \cdot 0,679 + \left(\frac{6,54 \div 6,28}{283,15} \right)^{1,43} \times \\ \times \left[384 \cdot (1 - 0,015) \cdot \left(\frac{6,54 \div 6,28}{283,15} \right)^{0,8} + 26,4 \cdot 0,015 \right] = \\ = 1,394 \div 1,386 \approx 1,385.$$

Как видно, табличное и расчетное значения показателей адиабаты для метана CH_4 являются близкими (погрешность 0,9 %), а величина показателя адиабаты для природного газа находится под явным влиянием содержания примесей (погрешность 5,3 %).

Тогда удельная теплоемкость составит:

- для метана

$$C_{p(CH_4)} = \frac{1,303 \cdot 518,23}{1,303 - 1} = 2228,56 \text{ Дж/(кг·К)};$$

- для природного газа

$$C_{p(пр)} = \frac{1,385 \cdot 510}{1,385 - 1} = 1834,66 \text{ Дж/(кг·К)}.$$

Удельная газовая постоянная для природного газа $R_{г(пр)}$ составит:

$$R_{г(пр)} = \frac{R}{m_{пр}} = \frac{8314}{16,302} = 510 \text{ Дж/(кг·К)}.$$

Расчетное значение удельной теплоемкости для метана $C_{p(CH_4)}^{расч} = 2228,56 \text{ Дж/(кг·К)}$, полученное по формуле (5), практически соответствует (погрешность 0,11 %) его табличному значению $C_{p(CH_4)}^{табл} = 2226 \text{ Дж/(кг·К)}$ при условиях, близких к стандартным ($T_c = 300 \text{ К}$ (27°C), $P_c = 0,1013 \text{ МПа}$) [10], но заметно отличается от расчетного значения удельной теплоемкости природного газа $C_{p(пр)}^{расч}$, вычисленного также по формуле (5). Это объясняется тем, что с понижением температуры теплоемкость вещества уменьшается [7]. Кроме того, примеси азота N_2 и диоксида углерода CO_2 имеют кратно меньшую теплоемкость ($C_{p(N_2)} = 1021 \text{ Дж/(кг·К)}$ и $C_{p(CO_2)} = 808 \text{ Дж/(кг·К)}$), чем теплоемкость метана, равная $2228,56 \text{ Дж/(кг·К)}$, что также влияет на снижение теплоемкости природного газа — метана CH_4 с примесями N_2 и CO_2 .

Таким образом, при расчетах, связанных с использованием показателей адиабаты и удельной теплоемкости, не следует применительно к природному газу использовать табличные значения этих показателей для метана на том основании, что 98 %-ное содержание последнего в природном газе полностью определяет свойства газовой смеси.

Другой метод расчета удельной теплоемкости природного газа для магистральных газопроводов, рекомендованный в нормах технологического проектирования ОНТП 51-1-85 [11], основан на статистической формуле

$$C_p = 1,695 + 1,838 \cdot 10^{-3} + 1,96 \cdot 10^6 \frac{P - 0,1}{T^3}, \quad (14)$$

где T , P — абсолютные значения средней температуры $T_{ср}$ и среднего давления $P_{ср}$ газа в газопроводе.

Однако на этом этапе расчетов метод, изложенный в [11], строго говоря, использовать недопустимо, так как формула (15) содержит параметр T_{cp} , а вычисления $C_{p(г)}$ предпринимаются как раз для определения этого параметра как температурной характеристики природного газа на рассматриваемом участке газопровода.

Таким образом, при вычислении удельной теплоемкости $C_{p(г)}$ и адиабаты $k_{г}$ для природного газа следует руководствоваться выражениями (5) и (9).

Коэффициент теплопередачи K_T ($Вт/(м^2 \cdot К)$) от газа к грунту определяется в соответствии с рекомендациями ОНТП 51-1-85 [11]:

$$K_T = \left(R_{из} + \frac{1}{\alpha_{гп}} \right)^{-1}, \quad (15)$$

где $R_{из}$ — термическое сопротивление изоляции трубопровода, $К/Вт$;

$\alpha_{гп}$ — коэффициент теплоотдачи от трубопровода в грунт, $Вт/(м^2 \cdot К)$;

$$\alpha_{гп} = \frac{\lambda_{гп}}{C_3 d_n} \left[0,65 + \left(\frac{C_3 d_n}{h_{оэ}} \right)^2 \right]; \quad (16)$$

$\lambda_{гп}$ — коэффициент теплопроводности грунта, $Вт/(м \cdot К)$;

C_3 — коэффициент при расчете в системе СИ; $C_3 = 1$;

$h_{оэ}$ — эквивалентная глубина заложения трубопровода, м;

$$h_{оэ} = h_o + \lambda_{гп} \left(\frac{1}{\alpha_v} + \frac{\delta_{сп}}{\lambda_{сп}} \right); \quad (17)$$

h_o — глубина заложения оси трубопровода от поверхности грунта, м;

α_v — коэффициент теплоотдачи от поверхности грунта в атмосферу, $Вт/(м^2 \cdot К)$;

$\delta_{сп}$ — толщина снежного покрова, м;

$\lambda_{сп}$ — коэффициент теплопроводности снежного покрова, $Вт/(м \cdot К)$.

Глубина заложения оси трубопровода определяется в соответствии с проектной документацией. Для расчета принимается $h_o = 2$ м. Коэффициент теплопроводности грунта $\lambda_{гп}$ определяется инструментально или по таблицам. Для удобства таблич-

Таблица 1. Коэффициент теплопроводности грунтов в зависимости от степени увлажнения

Вид грунта	Коэффициент теплопроводности грунта $\lambda_{гп}$, $Вт/(м \cdot К)$		
	сухого	влажного	влажонасыщенного
Песок, супесь	1,10	1,92	2,44
Глина, суглинок	1,74	2,56	2,67
Гравий, щебень	2,03	2,73	3,47

ные значения коэффициентов теплопроводности обобщенного ассортимента грунтов представлены в табл. 1, заимствованной из работы [12].

Для расчета принимается табличное значение $\lambda_{гп}$, равное $2,56$ $Вт/(м \cdot К)$, что соответствует значению для суглинка влажного. Коэффициент теплоотдачи от поверхности грунта в атмосферу вычисляется по формуле [11, 13]:

$$\alpha_v = m_1 + m_2 v, \quad (18)$$

где m_1, m_2 — эмпирические коэффициенты при расчете в системе СИ; $m_1 = 6,2, m_2 = 4,2$;

v — скорость ветра, м/с; выбирается по климатическим справочникам.

Для удобства работы средняя скорость ветра v_{cp} для некоторых регионов Российской Федерации приведена в табл. 2 [14].

Для регионов Среднего Урала европейской части России (Республика Коми) средняя скорость ветра составляет $3,0$ м/с. Тогда

$$\alpha_v = 6,2 + 4,2 \cdot 3,0 = 18,8 \text{ } Вт/(м^2 \cdot К).$$

Таблица 2. Средняя скорость v_{cp} ветра для некоторых регионов РФ [14]

Регион	v_{cp} , м/с
Амурская обл.	1,2–3,2
Архангельская обл.	3,1–7,8
Астраханская обл.	4,6–4,7
Республика Башкортостан	3,5–4,3
Волгоградская обл.	4,1–5,2
Вологодская обл.	3,3–5,1
Нижегородская обл.	3,4–4,7
Иркутская обл.	1,7–3,6
Калининградская обл.	4,5–4,7
Камчатский край	1,6–10,0
Карельская обл.	3,2–5,1
Кемеровская обл.	1,5–4,9
Республика Коми	2,3–4,9
Краснодарский край	3,0–6,3
Красноярский край	1,1–7,5
Магаданская обл.	1,7–8,6
Мурманская обл.	3,0–6,3
Пермский край	3,1–4,2
Сахалинская обл.	3,7–9,3
Свердловская обл.	3,9–4,0
Томская обл.	3,5–4,7
Тюменская обл.	3,5–7,0
Хабаровский край	1,5–6,3
Республика Якутия (Саха)	0,9–5,1

Толщина снежного покрова $\delta_{\text{сп}}$ находится также по климатическим справочникам и для европейской зоны Среднего Урала составляет 1,01 м [15].

Коэффициент теплопроводности снежного покрова $\lambda_{\text{сп}}$ определяется в зависимости от его толщины $\delta_{\text{сп}}$ и плотности снега $\rho_{\text{сн}}$ [12] по формулам:

- Абельса при $\rho_{\text{сн}} \leq 350 \text{ кг/м}^3$:

$$\lambda_{\text{сп}} = 2,85 \cdot 10^{-6} \rho_{\text{сн}}^2; \quad (19)$$

- Кондратьевой при $\rho_{\text{сн}} > 350 \text{ кг/м}^3$:

$$\lambda_{\text{сп}} = 3,56 \cdot 10^{-6} \rho_{\text{сн}}^2, \quad (20)$$

где $\rho_{\text{сн}}$ — плотность снега, определяемая по формуле Абе:

$$\rho_{\text{сн}} = a \cdot 10^{bz}; \quad (21)$$

a, b — константы; $a = 185,4$; $b = 0,545$;

z — глубина точки расчета от поверхности снега, м.

Для определения среднего значения плотности $\rho_{\text{сн(ср)}}$ снежного покрова примем, что глубина точки расчета $z_{\text{ср}}$ находится в середине толщины снежного покрова:

$$z_{\text{ср}} = \delta_{\text{сп}} / 2 = 1,01 / 2 = 0,505 \text{ м.}$$

Тогда среднее значение плотности снежного покрова

$$\rho_{\text{сн(ср)}} = 185,4 \cdot 10^{0,545 \cdot 0,505} = 349,41 \text{ кг/м}^3.$$

Теперь можно определить коэффициент теплопроводности снежного покрова при $\rho_{\text{сн}} < 350 \text{ кг/м}^3$:

$$\lambda_{\text{сп}} = 2,85 \cdot 10^{-6} \cdot 349,41^2 = 0,348 \text{ Вт/(м} \cdot \text{К)}.$$

Подставив полученные значения в (17), определим эквивалентную глубину заложения оси трубопровода:

$$h_{\text{оэ}} = 2 + 2,56 \left(\frac{1}{18,8} + \frac{1,01}{0,348} \right) = 9,566 \text{ м.}$$

Подставив этот результат в (16), получим:

$$\alpha_{\text{гр}} = \frac{2,56}{1,42} \left[0,65 + \left(\frac{1,42}{9,566} \right)^2 \right] = 1,212 \text{ Вт/(м}^2 \cdot \text{К)}.$$

Термическое сопротивление изоляции трубопровода $R_{\text{из}}$ (К/Вт) определяется в соответствии с [11] по формуле

$$R_{\text{из}} = \frac{m d_{\text{н}}}{2 \lambda_{\text{из}}} \ln \frac{d_{\text{из}}}{d_{\text{н}}}, \quad (22)$$

где $m = 1$, если используется система СИ;

$\lambda_{\text{из}}$ — коэффициент теплопроводности изоляции трубопровода, Вт/(м·К);

$d_{\text{из}}$ — наружный диаметр трубопровода с изоляцией, м.

Рассмотрим трубопровод, состоящий из труб с заводским полимерным покрытием толщиной $\delta_{\text{п}} =$

$= 0,006 \text{ м}$ и с коэффициентом теплопроводности $\lambda_{\text{из}} = 0,384 \text{ Вт/(м} \cdot \text{К)}$. Тогда

$$R_{\text{из}} = \frac{1,420}{2 \cdot 0,384} \ln \frac{1,420 + 2 \cdot 0,006}{1,420} = 0,0156 \text{ К/Вт.}$$

Подставив это значение в (15), получим коэффициент теплопередачи от потока газа к грунту:

$$K_{\text{т}} = \left(0,0156 + \frac{1}{1,212} \right)^{-1} = 1,19 \text{ Вт/(м}^2 \cdot \text{К)}.$$

Относительная плотность газа Δ определяется как отношение плотностей природного газа $\rho_{\text{пг(с)}}$ и воздуха $\rho_{\text{в(с)}}$ при стандартных условиях:

$$\Delta = \rho_{\text{пг(с)}} / \rho_{\text{в(с)}}. \quad (23)$$

Величина $\rho_{\text{в(с)}}$ является табличной и составляет $\rho_{\text{в(с)}} = 1,206 \text{ кг/м}^3$. Значение $\rho_{\text{пг(с)}}$ определено ранее по формуле (13): $\rho_{\text{пг(с)}} = 0,679 \text{ кг/м}^3$. Тогда

$$\Delta = 0,679 / 1,206 = 0,563.$$

Массовая производительность газопровода $Q_{\text{с}}$ определяется из его годовой производительности $Q_{\text{год}}$, которую можно рассчитать по формуле (12.6) из [11]. Однако поскольку такие расчеты уже сделаны в работе В. Д. Белицкого [16], для определения годовой производительности можно воспользоваться данными табл. 3.

Как видно из табл. 3, при $P_{\text{наг}} = 7,5 \text{ МПа}$, $P_{\text{вс}} = 5,1 \text{ МПа}$ и $D_{\text{г}} = 1400 \text{ мм}$ годовая производительность $Q_{\text{год}}$ составляет 28,4–34,7 млрд. м³/год.

Массовый расход в единицу времени определится из выражения

$$Q_{\text{с}} = Q_{\text{год}} \rho_{\text{г(н)}} / t_{\text{п}}, \quad (24)$$

где $\rho_{\text{г(н)}}$ — плотность природного газа при нормальных условиях ($P_{\text{н}} = 0,1013 \text{ МПа}$, $T_{\text{н}} = 273,15 \text{ К}$); $t_{\text{п}}$ — поправочный временной коэффициент; $t_{\text{п}} = 31,536 \cdot 10^6$;

$$\frac{\rho_{\text{г(н)}}}{\rho_{\text{г(с)}}} = \frac{T_{\text{с}}}{T_{\text{н}}}. \quad (25)$$

Таблица 3. Годовая производительность $Q_{\text{год}}$, млрд. м³, магистрального газопровода по В. Д. Белицкому [16]

Условный диаметр $D_{\text{г}}$, мм	Параметры нагнетания	
	$P_{\text{наг}} = 5,5 \text{ МПа}$, $P_{\text{вс}} = 3,8 \text{ МПа}$	$P_{\text{наг}} = 7,5 \text{ МПа}$, $P_{\text{вс}} = 5,1 \text{ МПа}$
500	1,6–2,0	2,2–2,7
600	2,6–3,2	3,4–4,1
700	3,8–4,5	4,9–6,0
800	5,2–6,4	6,9–8,4
1000	9,2–11,2	12,1–14,8
1200	14,6–17,8	19,3–23,5
1400	21,5–26,4	28,4–34,7

Отсюда

$$\rho_{г(н)} = \rho_{г(с)} \left(\frac{T_c}{T_n} \right) = 0,679 \cdot \frac{293,15}{273,15} = 0,729 \text{ кг/м}^3. \quad (26)$$

В этом случае массовый расход газа составит:

$$Q_c = (28,4 \div 34,7) \cdot 10^9 \cdot 0,729 / (31,536 \cdot 10^6) = \\ = (656,51 \div 802,14) \text{ кг/с}.$$

Средняя температура газа определяется для каждого аварийного участка в следующем порядке.

Подставив значения C_p , K_T , Δ и Q_c в формулу (4), вычислим температуру газа $T_{к1}$ в конце 1-го аварийного участка:

$$T_{к1} = 278,15 + \\ + \exp \left[0,0216 \cdot \frac{(283,15 - 278,15)(656,51 \div 802,14)}{1,19 \cdot 1,420 \cdot 60 \cdot 10^3} \times \right. \\ \left. \times 0,563 \cdot 1834,66 \right] = 280,21 \div 280,57 \approx \\ \approx 280,39 \text{ К } (7,24 \text{ } ^\circ\text{C}).$$

Тогда средняя температура $T_{ср1}$ для 1-го аварийного участка в соответствии с формулой (2) составит:

$$T_{ср1} = 280,39 + (283,15 - 280,39) \frac{60 - 30}{60} = \\ = 281,77 \text{ К } (8,6 \text{ } ^\circ\text{C}).$$

Средняя температура на 2-м аварийном участке определяется из выражения

$$T_{ср2} = T_{к2} + (T_{к1} - T_{к2}) \frac{L_2 - x_2}{L_2},$$

где L_1 , L_2 , x_2 — расстояния, км;

$T_{к2}$ — температура газа в конце 2-го аварийного участка;

$$T_{к2} = T_{гp} + \exp \left[0,0216 \frac{(T_{к1} - T_{гp}) Q_c \Delta C_p}{K_T d_n L_2} \right]. \quad (28)$$

Подставив полученные данные в формулу (28), получим:

$$T_{к2} = 278,15 + \exp \left[0,0216 \cdot \frac{(280,39 - 278,15)}{1,19 \cdot 1,420 \cdot 60 \cdot 10^3} \times \right. \\ \left. \times (656,51 \div 802,14) \cdot 0,563 \cdot 1834,66 \right] = \\ = 279,53 \div 279,63 = 279,58 \text{ К } (6,41 \text{ } ^\circ\text{C}).$$

В этом случае средняя температура $T_{ср2}$ для 2-го аварийного участка составит:

$$T_{ср2} = 279,58 + (280,39 - 279,58) \cdot \frac{60 - 30}{60} = \\ = 279,91 \text{ К } (6,76 \text{ } ^\circ\text{C}).$$

Параметры $T_{ср1}$ и $T_{ср2}$ предназначены для определения массы газа, находящегося в газопроводе фиксированной длины (между КС или между линейными кранами) до его аварийного разрыва.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Стромберг А. Г., Семченко Д. П.* Физическая химия : учебник для хим. специальностей вузов / Под ред. А. Г. Стромберга. — 7-е изд. стер. — М. : Высшая школа, 2009. — 527 с.
2. *СТО Газпром 2-2.3-351–2009.* Методические указания по проведению анализа риска опасных производственных объектов газотранспортных предприятий ОАО “Газпром”. — М. : ОАО Газпром, 2009. — 377 с.
3. *ГОСТ Р 12.3.047–2012.* ССБТ. Пожарная безопасность технологических процессов. Общие требования. Методы контроля. — Введ. 27.12.2012. URL : <http://vsegost.com/Catalog/54/54765.shtml> (дата обращения: 24.12.2014).
4. Методика определения расчетных величин пожарного риска на производственных объектах : приложение к приказу МЧС РФ от 10.07.2009 № 404 (с изм.: приказ МЧС РФ от 14.12.2010 № 649). URL : <http://www.consultant.ru> (дата обращения: 24.12.2014).
5. *РД 03-409–01.* Методика оценки последствий аварийных взрывов топливовоздушных смесей (с изм. и доп.) : постановление Госгортехнадзора РФ от 26.06.2001 № 25; введ. 26.06.2001. — М. : НТЦ “Промышленная безопасность”, 2001. — 24 с.
6. *Котляр И. Я., Пиляк В. М.* Эксплуатация магистральных газопроводов. — Л. : Недра, 1971. — 248 с.
7. *Сапожников С. З., Китанин Э. Л.* Техническая термодинамика и теплопередача : учебник для вузов. — СПб. : СПГТУ, 1999. — 319 с.
8. *Кикоин И. К.* Таблицы физических величин. — М. : Атомиздат, 1976. — 1008 с.
9. *ГОСТ 30319.1–96.* Газ природный. Методы расчета физических свойств. Определение физических свойств природного газа, его компонентов и продуктов его переработки. — Введ. 01.07.1997. — Минск : Госстандарт РФ, 1996. — 20 с.

10. Инженерный справочник. Химический справочник. URL : <http://www.DPVA.info> (дата обращения: 05.12.2014).
11. ОНТП 51-1-85. Общесоюзные нормы технологического проектирования. Магистральные трубопроводы. Часть 1. Газопроводы : приказ Минпрома СССР от 29.10.85 № 255; введ. 01.01.1986. — М. : Мингазпром, 1986. — 101 с.
12. Таблица коэффициентов теплопроводности грунтов в зависимости от степени увлажнения // Экологические системы : электронный журнал энергосервисной компании. — Март 2002. — № 3. URL : http://esco-ecosys.narod.ru/2002_3/art32.htm (дата обращения: 05.12.2014).
13. Бухмиров В. В. Расчет коэффициента теплоотдачи : учебное пособие для вузов. — Иваново : Ивановский гос. энергетический ун-т, 2007. — 78 с.
14. Таблица средней скорости ветра регионов РФ. URL : enargo.ru/alter-energy-wind-ru.php (дата обращения: 05.12.2014).
15. Гавришев А. Н. Климат городов России. URL : <http://www.atlas-yakutia.ru> (дата обращения: 05.12.2014).
16. Белицкий В. Д., Ломов С. М. Проектирование и эксплуатация магистральных газопроводов. — Омск : ОмГТУ, 2011. — 62 с.

Материал поступил в редакцию 21 января 2015 г.

English

DETERMINATION OF THE AVERAGE GAS TEMPERATURE IN THE EMERGENCY SECTION OF THE MAIN PIPELINE

BYKOV A. I., Leading Engineer of Fire Safety Service, LLC "Gazprom transgaz Ukhta" (Lenina Avenue, 39/2, Ukhta, 169300, Komi Republic, Russian Federation; e-mail address: abykov@sgp.gazprom.ru)

ABSTRACT

Parameter average temperature T_{cp} is necessary, for example, to estimate the mass of natural gas involved in the formation of a fiery torch in case of emergency destruction of the main pipeline. However, the methodology for a systematic calculation of this parameter in the current methodological and normative documents, the author has not found.

Despite the apparent simplicity of the problem, the analysis showed that the parameter of T_{cp} depends primarily on the calculation of the parameter of the gas temperature T_k at the end of the emergency section of the pipeline, which, in turn, depends on the mass performance of the Q_c pipeline, specific heat of natural gas C_p , the relative density of natural gas Δ , the length of the section of the pipeline L , the outer diameter of the pipe d_n , the heat transfer coefficient K_t and more than two dozen parameters that characterize the state of a gas in terms of its transport and depressurization of the pipeline. Calculations of the number of parameters regulated in several regulatory documents, which introduces uncertainty in the choice of the calculation scheme and is accompanied by the production of different calculation results.

Calculations of other parameters recommended by the standard methods are complex, three-dimensional routine, require access to specialized software products that are not available in the current engineering activities.

To clarify these discrepancies, the rationale for the recommended design solutions and adapting them in a simple, systematic methodology for calculating the average temperature in different parts of the main pipeline the subject of this article.

Keywords: emergency section of the main pipeline; mass of gas; average temperature gas; specific heat of natural gas; heat transfer coefficient from the gas to the ground.

REFERENCES

1. Stromberg A. G., Semchenko D. P. *Fizicheskaya khimiya* [Physical chemistry]. Moscow, Vysshaya shkola Publ., 2009. 527 p.

2. *Standard of organization Gazprom 2-2.3-351–2009. Guidelines for conducting risk analysis of hazardous production facilities gas transmission companies of JSC “Gazprom”*. Moscow, JSC Gazprom Publ., 2009. 377 p. (in Russian).
3. *State standard 12.3.047–2012. Fire safety of technological processes. General requirements. Methods of control*. Available at: <http://vsegest.com/Catalog/54/54765.shtml> (Accessed 24 December 2014) (in Russian).
4. The methodology for determining the estimated values of fire risk at the production facilities. Annex to order of Emercom of Russia No. 404 on 10.07.2009. Available at: <http://www.consultant.ru> (Accessed 24 December 2014) (in Russian).
5. *Guidance document 03-409–01. A method of estimating the effects of accidental explosions of fuel-air mixtures*. Moscow, NTTs Promyshlennaya bezopasnost Publ., 2001. 24 p. (in Russian).
6. Kotlyar I. Ya., Pilyak V. M. *Ekspluatatsiya magistralnykh gazoprovodov* [The operation of gas pipelines]. Leningrad, Nedra Publ., 1971. 248 p.
7. Sapozhnikov S. Z., Kitanin E. L. *Tekhnicheskaya termodinamika i teploperedacha* [Technical thermodynamics and heat transfer]. Saint Petersburg, Saint Petersburg Polytechnic University Publ., 1999. 319 p.
8. Kikoin I. K. *Tablitsy fizicheskikh velichin* [Tables of physical quantities]. Moscow, Atomizdat Publ., 1976. 1008 p.
9. *State standard 30319.1–96. Gas natural. Methods of calculation of physical properties*. Minsk, Federal Agency on Technical Regulating and Metrology Publ., 1996. 20 p. (in Russian).
10. *Inzhenernyy spravochnik. Khimicheskyy spravochnik* [Engineering Handbook. Chemical Handbook]. Available at: <http://www.DPVA.info> (Accessed 5 December 2014).
11. *All-Union standards for technological design 51-I–85. Trunk pipelines. Part 1. Gas pipelines*. Order of the Ministry of Industry of the USSR No. 255 on 29.10.85. Moscow, Mingazprom Publ., 1986. 101 p. (in Russian).
12. *Tablitsa koefitsientov teploprovodnosti gruntov v zavisimosti ot stepeni uvlazhneniya* [Table of thermal conductivity of soil, depending on the degree of hydration]. *Elektronnyy zhurnal energoservisnoy kompanii “Ekologicheskiye sistemy”* [Electronic journal of energy service company “Ecological systems”], March 2002, no. 3. Available at: http://esco-ecosys.narod.ru/2002_3/art32.htm (Accessed 5 December 2014).
13. Bukhmirov V. V. *Raschet koefitsienta teploperedachi* [The calculation of heat transfer coefficient]. Ivanovo, Ivanovo State Power Engineering University Publ., 2007. 78 p.
14. *Tablitsa sredney skorosti vetra regionov RF* [Table average wind speed regions of the Russian Federation]. Available at: <http://www.enargo.ru/alter-energy-wind-ru.php> (Accessed 5 December 2014).
15. Gavrishchev A. N. *Klimat gorodov Rossii* [Climate of the cities of Russia]. Available at <http://www.atlas-yakutia.ru> (Accessed 5 December 2014).
16. Belitskiy V. D., Lomov S. M. *Proyektirovaniye i ekspluatatsiya magistralnykh gazoprovodov* [The design and operation of gas pipelines]. Omsk, Omsk State Technical University Publ., 2011. 62 p.

Г. Г. ОРЛОВ, д-р техн. наук, профессор кафедры комплексной безопасности в строительстве, Московский государственный строительный университет (Россия, 129337, г. Москва, Ярославское шоссе, 26; e-mail: ICA_kbs@mgsu.ru)

Д. А. КОРОЛЬЧЕНКО, канд. техн. наук, заведующий кафедрой комплексной безопасности в строительстве, Московский государственный строительный университет (Россия, 129337, г. Москва, Ярославское шоссе, 26; e-mail: ICA_kbs@mgsu.ru)

А. Я. КОРОЛЬЧЕНКО, д-р техн. наук, профессор, профессор кафедры комплексной безопасности в строительстве, Московский государственный строительный университет (Россия, 129337, г. Москва, Ярославское шоссе, 26; e-mail: ICA_kbs@mgsu.ru)

УДК 614.841.123.24

ЭКОНОМИЧЕСКАЯ ОЦЕНКА ЭФФЕКТИВНОСТИ ПРИМЕНЕНИЯ ПРЕДОХРАНИТЕЛЬНЫХ КОНСТРУКЦИЙ ДЛЯ ОБЕСПЕЧЕНИЯ ВЗРЫВОУСТОЙЧИВОСТИ ЗДАНИЙ И СООРУЖЕНИЙ

Рассмотрена модель экономической оценки и обоснования выбора варианта предохранительных конструкций (ПК), а также определения эффективности защиты зданий и сооружений от взрывов на этапе строительства. Показано, что определение экономической эффективности применения ПК сводится к оценке целесообразности их применения для зданий с производствами, управляемыми дистанционно или автоматически. Определено, что важную роль при проектировании взрывоопасных производств играет выбор экономически выгодных и эффективных материалов для ПК. При выборе материалов следует также учитывать вероятность взрывов, приводящих к их разрушению. Выявлена необходимость в создании методики, позволяющей учитывать такую вероятность.

Ключевые слова: предохранительные конструкции; экономически эффективные материалы; взрыв производственного здания; взрывозащита; затраты на взрывозащиту зданий; проектирование взрывоопасных производств.

Величина материального ущерба, причиняемого предприятию в результате взрыва горючих газов, паров и пылей внутри здания со взрывоопасным производством, зависит от эффективности мероприятий по обеспечению его взрывобезопасности [1–3].

Результаты обследования последствий аварийных взрывов и расчеты нагрузок от взрывов внутри конкретных зданий, в наружном ограждении которых были запроектированы предохранительные конструкции (ПК), показали, что, помимо разрушения ПК, имеют место повреждения основных ограждающих и несущих конструкций здания, а иногда и конструкций соседних зданий [4].

Предлагаемые решения по обеспечению взрывозащиты промышленных зданий отличаются от существующих дифференцированным подходом к подбору типов и количества ПК для каждого конкретного случая [5–9]. При этом производство самих ПК, за исключением специально разработанных деталей для покрытия, не требует дополнительных затрат, так как предлагаемые в качестве ПК строительные конструкции являются типовыми и выпускаются в промышленных масштабах. Применение в наружном ограждении зданий ПК, количество и тип кото-

рых соответствуют ранее разработанным, ограничивает площадь повреждения зданий размерами разрушенной ПК в стеновом ограждении и на участках, где предусматривается устройство легковскрываемого покрытия. При наличии таких повреждений стоимость ущерба будет минимальной из-за отсутствия необходимости в затратах на восстановление технологического оборудования и основных строительных конструкций [10, 11]. При этом резко сокращаются затраты на ремонтно-восстановительные работы, уменьшаются потери от временного прекращения производственной деятельности предприятия. В то же время необходимо отметить, что проведение мероприятий по повышению взрывобезопасности производств, в технологических процессах которых используются горючие газы, пары и пыли, связано с рядом дополнительных затрат.

Для повышения взрывобезопасности зданий, помимо применения ПК, используются методы пассивного резервирования — усиление основных несущих конструкций зданий за счет увеличения сечения конструкций, повышения их жесткости, изменения конструктивной схемы здания и т. п. [12–15].

С увеличением площади ПК, а также несущей способности основных конструкций взрывобезопасность здания повышается. Одновременно увеличиваются его первоначальная стоимость и эксплуатационные расходы, так как стоимость возведения 1 м² ПК, как правило, больше стоимости 1 м² основных ограждающих конструкций. Это приводит также к увеличению отчислений на амортизацию и содержание конструкций в процессе эксплуатации здания. Кроме того, потери тепла через ПК, расположенные в покрытии или стеновом ограждении, значительно больше, чем через основные, что, в свою очередь, вызывает дополнительное увеличение эксплуатационных расходов.

Вопрос о проведении мероприятий по обеспечению взрывобезопасности должен рассматриваться в каждом случае применительно к конкретному предприятию.

Становится очевидным, что для предприятий, на которых находится обслуживающий персонал, просто необходимо предусматривать меры по обеспечению взрывобезопасности в целях защиты людей, технологического оборудования и основных строительных конструкций.

Для промышленных зданий, сооружений и цехов с автоматическим и дистанционным управлением, где обслуживающий персонал отсутствует, а вероятность возникновения взрыва относительно мала, возможно, разрушение конструкций здания будет экономически оправданно, если затраты на восстановление не будут превосходить затрат на устройство ПК.

Экономическое обоснование предлагаемого варианта ПК может потребовать рассмотрения одной из следующих задач:

- 1) при наличии в здании обслуживающего персонала — определение экономически обоснованных конструктивных решений ПК, выбор материала и определение требуемой площади ПК;
- 2) при отсутствии в здании обслуживающего персонала — оценка целесообразности устройства ПК исходя из анализа суммарных затрат на строительство, эксплуатацию и восстановление здания и затрат на устройство ПК.

Таким образом, определение экономической эффективности применения ПК сводится к оценке целесообразности их применения для зданий с производствами, управляемыми дистанционно или автоматически. В этом случае следует установить необходимость устройства ПК. Если такая необходимость существует, надо установить оптимальные варианты ПК, обеспечивающие взрывобезопасность здания.

В процессе проектирования зданий для взрывоопасных производств существенное место занима-

ют вопросы выбора экономически эффективных материалов для изготовления ПК, который должен осуществляться с учетом стоимости материалов, затрат на возведение ПК и эксплуатацию здания. Задача заключается в том, чтобы свести к минимуму полные затраты на возведение и эксплуатацию здания при использовании ПК. Так как указанные затраты являются разновременными, для их суммирования можно использовать рекомендованный “Инструкцией по определению экономической эффективности капитальных вложений в строительстве” (СН 423–71) метод приведения разновременных затрат к сопоставимому виду, в основе которого лежит формула сложных процентов:

$$B = 1/(1 + E_{н.п})^t, \quad (1)$$

где $E_{н.п}$ — норматив для приведения разновременных затрат к сопоставимому виду; $E_{н.п} = 0,08$; t — период времени приведения, годы.

При выборе материалов для изготовления ПК следует также учитывать вероятность возникновения взрывов, приводящих к разрушению ПК. Нужно отметить, что действующая инструктивная и нормативная литература по экономической оценке вариантов проектных решений со стохастическими, вероятностными показателями не дает рекомендаций по их оценке. В связи с этим возникает необходимость в создании методики, позволяющей учитывать вероятность возникновения взрывов и разрушения ПК. Для этого надо иметь статистические данные по частоте взрывов на однотипных производствах. В настоящее время по ряду производств (дивинила, гидропероксида изопренбензола, аммиака и др.) имеются некоторые данные, позволяющие при помощи вероятностно-статистических методов вычислить средний период $t_{ср}$ между взрывами:

$$t_{ср} = 1/\lambda_k, \quad (2)$$

где λ_k — интенсивность разрушения конструкций, измеряемая количеством разрушений за один год эксплуатации;

$$\lambda_k = \frac{n\lambda}{Nr(t)}; \quad (3)$$

n — общее число однотипных строительных конструкций;

λ — интенсивность возникновения взрывов;

N — количество однотипных строительных конструкций, за которыми велось наблюдение;

$N = (r - 1)/(Ntr)$;

$r(t)$ — число взрывов за период наблюдения.

Выбор материала для ПК можно проводить по критерию минимальных суммарных затрат Π (тыс. руб.) на изготовление (возведение), восстановление и экс-

плутацию конструкций за период функционирования здания:

$$П = C_{к0} + \sum_{i=t_{cp}}^{r(i)t_{cp}} \frac{C_i - C_{к.ост}}{(1 + E_{н.п})^i} + \frac{1}{E_{н.п}} \mathcal{E}^{год}, \quad (4)$$

где $C_{к0}$ — первоначальная сметная стоимость ПК, тыс. руб.;

t_{cp} — среднее время безаварийной работы здания, т. е. период между взрывами (определяется по формуле (2)), ч;

C_i — затраты, непосредственно связанные с восстановлением ПК, тыс. руб.;

$C_{к.ост}$ — остаточная стоимость разрушенных конструкций, тыс. руб.;

i — период возникновения взрывов, годы;

$i = t_{cp}, 2t_{cp}, \dots, at_{cp}$;

a — величина, показывающая, что восстановление здания осуществляется целое количество раз (т. е. учитывается только целая часть отношения);

$a = (T_{сл} - 1)/t_{cp}$;

$T_{сл}$ — нормативный срок службы здания в целом, годы;

$\mathcal{E}^{год}$ — годовые эксплуатационные затраты, отчисления на амортизацию и содержание конструкций, тыс. руб.

Последнее слагаемое формулы (4) учитывает суммарные эксплуатационные затраты за весь период функционирования здания. Так как годовые эксплуатационные затраты $\mathcal{E}^{год}$ отдалены друг от друга на один год, они являются разновременными. Известно, что суммирование таких затрат возможно после их приведения к определенному моменту времени. Поскольку в формуле (4) в затратах по первому и второму слагаемому учитываются вложения в период первоначального устройства ПК, то и в данном случае для определения эксплуатационных затрат выбран момент начала их эксплуатации.

Приведение выполняется при помощи формулы

$$\mathcal{E} T_{сл} = \sum_{i=1}^{T_{сл}} \mathcal{E}_i^{год} \frac{1}{(1 + E_{н.п})^i}. \quad (5)$$

Если эксплуатационные затраты не меняются по годам, т. е. $\mathcal{E}_1^{год} = \mathcal{E}_2^{год} = \mathcal{E}_3^{год} = \text{const}$, то $\mathcal{E}^{год}$ можно вынести за знак суммы. Тогда оставшаяся часть выражения, представляющая собой сумму убывающей геометрической прогрессии с первым членом a и знаменателем g , равным $1/(1 + E_{н.п})$ (при $T_{сл}$, стремящемся к бесконечности), имеет вид

$$\sum = \frac{a}{1 - g} = \frac{1}{E_{н.п}}. \quad (6)$$

Следовательно, суммарные эксплуатационные затраты будут равны $(1/E_{н.п}) \mathcal{E}^{год}$.

Защита зданий от воздействия взрыва горючих смесей внутри помещения может быть обеспечена:

- использованием ПК;
- усилением несущих конструкций здания;
- сочетанием ПК с усилением основных несущих конструкций.

Возникает необходимость в выборе такого варианта защиты, который потребует минимальных затрат при возведении и эксплуатации объекта на обеспечение заданной степени взрывобезопасности с учетом вероятности возникновения взрывов.

Минимум суммарных затрат определяется по формуле

$$\begin{aligned} П = & C_y + C^{расч} E_n \Phi_{пр} t_{стр} + \\ & + \frac{1}{E_{н.п}} \left(1,06 C_i \frac{a_1 + a_2}{100} + 3^{от} \right) + \\ & + \sum_{i=t_{cp}}^{r(i)t_{cp}} \frac{3_i + E_n \Phi_{пр} t_{ост}}{1 + E_{н.п}}, \end{aligned} \quad (7)$$

где C_y — сметная себестоимость работ по усилению основных несущих конструкций здания, тыс. руб.;

$C^{расч}$ — расчетная сметная себестоимость легко-сбрасываемых конструкций, тыс. руб.;

E_n — нормативный коэффициент экономической эффективности капитальных вложений;

$\Phi_{пр}$ — сметная стоимость производственных фондов строительных организаций, занятых на монтаже конструкций, тыс. руб.;

$t_{стр}$ — период монтажа, годы;

C_i — сметная себестоимость конструкций, тыс. руб.;

a_1, a_2 — нормативы реновационных отчислений и отчислений на содержание конструкций от их сметной стоимости;

$3^{от}$ — годовые затраты на отопление здания, тыс. руб.;

3_i — затраты, связанные с ликвидацией последствий взрывов в i -м году, тыс. руб.;

$t_{ост}$ — период остановки производства, связанный с ликвидацией последствий взрыва, годы.

Стоимость усиления несущих конструкций C_y должна устанавливаться расчетом для конкретного здания. При $C_y = 0$ взрывобезопасность здания достигается только при использовании ПК.

Расчетная себестоимость ПК определяется по соответствующим прейскурантам сметных цен на материалы, изделия и конструкции с учетом накладных расходов. При этом следует учитывать также экономический эффект $\mathcal{E}_i$ от снижения трудоемкости и сокращения продолжительности выполнения работ по возведению ПК:

$$C^{расч} = C_i - \mathcal{E}_i.$$

Величина $\mathcal{E}_i$ определяется исходя из следующих предпосылок:

- а) по всем вариантам предохранительных конструкций определяется трудоемкость работ m_i (чел.-дни);
- б) вариант с наибольшей трудоемкостью принимается за исходный;
- в) все остальные варианты с меньшей трудоемкостью при равных производственных условиях (одинаковое количество трудовых ресурсов, сменность) будут выполняться быстрее и, следовательно, давать по отношению к исходному варианту экономический эффект.

Для исходного варианта $\mathcal{E}_i = 0$. Для остальных вариантов величина $\mathcal{E}_i$ складывается из трех экономических эффектов:

$$\mathcal{E}_i = \mathcal{E}_i^1 + \mathcal{E}_i^2 + \mathcal{E}_i^3, \quad (8)$$

где $\mathcal{E}_i^1 + \mathcal{E}_i^2 + \mathcal{E}_i^3$ — экономические эффекты от сокращения, соответственно, условно постоянной части накладных расходов и части накладных расходов, связанных с трудоемкостью работ и основной заработной платой.

Эффект от сокращения условно постоянной части накладных расходов определяется по формуле

$$\mathcal{E}_i^1 = 0,5 \frac{CK_{н.р}}{(1 + K_{н.р}) 1,06} \left(1 - \frac{m_i}{m_{исх}} \right), \quad (9)$$

где 0,5 — коэффициент, учитывающий долю условно постоянных расходов в общем объеме накладных расходов;

C — себестоимость строительной продукции, тыс. руб.;

$K_{н.р}$ — коэффициент, учитывающий размер накладных расходов; $K_{н.р} = 0,12 \div 0,19$;

1,06 — коэффициент, учитывающий плановые накопления;

$m_{исх}$ — трудоемкость работ по возведению легкосбрасываемых конструкций по исходному варианту, чел.-дни.

Эффект от сокращения части накладных расходов, связанных с трудоемкостью работ, определяется по формуле

$$\mathcal{E}_i^2 = 0,6 (m_{исх} - m_i). \quad (10)$$

Эффект от сокращения части накладных расходов, связанных с основной заработной платой, определяется по формуле

$$\mathcal{E}_i^3 = 0,15 (Z_{исх} - Z_i), \quad (11)$$

где $Z_{исх}$, Z_i — основная заработная плата соответственно по исходному и i -му вариантам, руб.

Годовые затраты на отопление здания $Z^{от}$ могут определяться по формуле

$$Z^{от} = F_{ПК} Z_{м^2}^{от} = F_{ПК} \frac{Y_T (t_{вн}^0 - t_{ср}^0) 24 T_{от}}{R_{от} \cdot 10^6}, \quad (12)$$

где $F_{ПК}$ — площадь ПК, $м^2$;

$Z_{м^2}^{от}$ — затраты на отопление здания на $1 м^2$ в год;

Y_T — стоимость 1 Мкал тепла, руб.;

$t_{вн}^0$ — расчетная температура внутреннего воздуха, $^{\circ}C$;

$t_{ср}^0$ — средняя расчетная температура наружного воздуха за отопительный период, $^{\circ}C$;

24 — число часов в сутках;

$T_{от}$ — продолжительность отопительного периода, сут;

$R_{от}$ — термическое сопротивление стены или покрытия, $м^2 \cdot ^{\circ}C \cdot ч / ккал$.

Затраты Z , непосредственно связанные с ликвидацией последствий взрывов, определяются следующим образом:

1. Для вариантов, где площадь ПК удовлетворяет требованиям обеспечения гарантии неразрушения зданий в целом, параметр Z вычисляется по формуле

$$Z = Z_{ПК} + Z_{ок} + Z_{об} + Z_{см} + Z_{оч} - O, \quad (13)$$

где $Z_{ПК}$ — затраты на восстановление ПК; определяются по сметным нормам с учетом затрат на разработку;

$Z_{ок}$ — затраты на восстановление основных конструкций (если ПК не обеспечивают снижения взрывной нагрузки до допустимой);

$Z_{об}$ — затраты на восстановление оборудования и внутренних сетей;

$Z_{см}$ — затраты на восстановление смежных зданий и сооружений (если нанесен ущерб их конструкциям);

$Z_{оч}$ — затраты на очистку территории от разрушенных конструкций; определяются путем расчета фактических затрат на разработку и перевозку разрушенных конструкций;

O — остаточная стоимость поврежденных конструкций, если они могут быть повторно использованы (может быть принята в размере 10 % от стоимости ПК).

Затраты $Z_{ок}$, $Z_{об}$ и $Z_{см}$ устанавливаются путем умножения восстановительных объемов на соответствующие сметные нормы на ремонтные работы. Необходимые объемы восстановления определяются как средние величины по данным статистических наблюдений.

2. Для вариантов, где вследствие уменьшения площади ПК допускается разрушение здания в целом, затраты, связанные с ликвидацией последствий аварии, определяются по формуле

$$Z = C_1 + Z_{см} + Z_{оч} - O, \quad (14)$$

где C_1 — затраты на восстановление разрушенного здания, тыс. руб.

Для укрупненных расчетов величину Z можно принимать равной стоимости первоначального воз-

ведения ПК. Если известно изменение стоимости конструкций во времени, то в расчет следует ввести соответствующий поправочный коэффициент K_t . Тогда

$$Z = 1,06 C_i K_t. \quad (15)$$

Выводы

На основании рассмотренной модели экономической оценки и обоснования выбора варианта ПК, а также определения экономической эффективности защиты зданий и сооружений от взрывов строительными мероприятиями можно сделать следующие выводы.

1. Защита зданий от последствий взрыва внутри помещений применением ПК связана с дополнительными затратами. Поэтому задача обеспечения взрывобезопасности с наименьшими суммарными затратами на возведение и эксплуатацию здания является весьма важной.

2. При экономической оценке принятого варианта применения ПК основополагающим параметром является среднее время безаварийной работы здания, которое может быть выражено через интенсивность разрушений, являющуюся, как известно, случайной величиной. Для ее определения применимы вероятностно-статистические методы.

3. При выборе материалов для изготовления ПК необходимо свести к минимуму полные затраты на возведение и эксплуатацию ПК с учетом вероятности возникновения взрывов. Рассмотренный метод позволит подобрать такие материалы для ПК, применение которых сделает полные затраты минимальными.

4. Уравнение (7) для экономического обоснования выбора варианта ПК дает возможность установить суммарные затраты на строительство, эксплу-

атацию и восстановление здания с учетом вероятности возникновения взрыва. Анализ этого уравнения и расчеты показывают, что для зданий с технологиями с дистанционным и автоматическим управлением, где взрывы происходят с интервалом 12–15 лет и более, экономически оправданно уменьшение площадей ПК, полученных расчетом.

5. Расчеты экономической оценки эффективности ПК по приведенной методике только для зданий компрессорных по транспортировке горючих газов показывают, что для них экономический эффект при использовании разработанного метода обеспечения взрывобезопасности зданий со взрывоопасными производствами составляет около 3 % от суммарных затрат на строительство и эксплуатацию. С учетом строительства объектов только такого типа экономический эффект от внедрения результатов данного метода составит более 5 млн. руб. в год. Однако, с учетом того что перечень взрывоопасных производств в химической, нефтехимической, нефтеперерабатывающей, газовой и других отраслях промышленности включает несколько десятков наименований, экономический эффект составит несколько десятков миллионов рублей.

6. В целях оптимизации затрат на защиту зданий от взрывов необходимо использовать вероятностные методы определения возможности возникновения взрыва в зависимости от различных защитных мероприятий. Для этого может быть применена методика, разработанная ВНИИПО МВД. При этом должен быть учтен не только прямой ущерб, наносимый взрывом, но и косвенный, связанный с ликвидацией производства определенного вида промышленной продукции и необходимостью восстановления выбывших из строя мощностей.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Бесчастнов М. В., Соколов В. М., Кац М. И. Аварии в химических производствах и меры их предупреждения. — М. : Химия, 1976. — 367 с.
2. Анализ аварий, связанных со взрывами в химической промышленности : научно-технический отчет по теме 00-67-3.1.3. — Северодвинск : ВНИИТБХП, 1978. — 22 с.
3. СН 423–71. Инструкция по определению экономической эффективности капитальных вложений в строительстве. — Введ. 01.07.71. — М. : Стройиздат, 1972.
4. Орлов Г. Г., Лейбман А. Е., Манасян А. И. Определение экономически оптимальных площадей легкосбрасываемых ограждающих конструкций // Охрана труда в строительстве. — М. : МИСИ им. В. В. Куйбышева, 1978.
5. Шароварников А. Ф., Корольченко Д. А. Использование генераторов пены высокой кратности для тушения пожаров в складских помещениях // Научное обозрение. — 2014. — № 9, ч. 2. — С. 461–466.
6. Корольченко Д. А., Лукьянов А. М., Агапов А. Г. О пожароопасности древесины при возведении мостов // Мир транспорта. — 2012. — Т. 42, № 4. — С. 158.
7. Sharovarnikov A. F., Korolchenko D. A. Fighting fires of carbon dioxide in the closed buildings // Applied Mechanics and Materials. — 2013. — Vol. 475–476. — P. 1344–1350. doi: 10.4028/www.scientific.net/amm.475-476.1344.

8. Корольченко Д. А., Громоной В. Ю., Ворогушин О. О. Применение тонкораспыленной воды для тушения пожаров в высотных зданиях // Вестник МГСУ. — 2011. — № 1-2. — С. 331–335.
9. Gorshkov V. I., Korolchenko D. A., Shebeko Yu. N., Navtsenya V. Yu., Kostyukhin A. K. The peculiarities of application of gas-aerosol fire extinguishing tools in various rooms // Proceedings of Second International Seminar on Fire-and-Explosion Hazard of Substances and Venting of Deflagrations. — Moscow : All-Russian Research Institute for Fire Protection Publ., 1997. — P. 800–808.
10. Поддаева О. И. Физические исследования архитектурно-строительной аэродинамики для устойчивого проектирования в строительной отрасли // Промышленное и гражданское строительство. — 2013. — № 9. — С. 35–38.
11. Churin P., Poddaeva O. I. Aerodynamic testing of bridge structures // Applied Mechanics and Materials. — 2013. — Vol. 477–478. — P. 817–821. doi: 10.4028/www.scientific.net/amm.477-478.817.
12. Borkovskaya V. G. Post bifurcations of the concept of the sustainable development in construction business and education // Advanced Materials Research. — 2013. — Vol. 860–863. — P. 3009–3012. doi: 10.4028/www.scientific.net/AMR.860-863.3009.
13. Борковская В. Г. Стандарты и требования пожарной безопасности // Актуальные проблемы защиты окружающей среды и техносферной безопасности в меняющихся антропогенных условиях : материалы Международной научно-практической конференции “Белые ночи 2014”. — Грозный, 2014. — С. 519.
14. Холщевников В. В., Парфёненко А. П. О моделировании эвакуации людей и динамики опасных факторов пожара в целях нормирования эвакуационных путей // Технологии техносферной безопасности : интернет-журнал. — 2014. — Т. 53, № 1. — 8 с.
15. Холщевников В. В., Парфёненко А. П. Модели движения людских потоков в России // Интеграция, партнерство и инновации в строительной науке и образовании : сборник материалов Международной научно-практической конференции. — М. : МГСУ, 2015. — С. 286–289.

Материал поступил в редакцию 20 марта 2015 г.

English

ECONOMIC EFFICIENCY OF APPLICATION OF EXPLOSION-RELIEF VALVES IN ORDER TO ENSURE EXPLOSION STABILITY OF BUILDINGS AND CONSTRUCTIONS

ORLOV G. G., Doctor of Technical Sciences, Professor of Department of Complex Safety in Construction, Moscow State University of Civil Engineering (Yaroslavskoye Shosse, 26, Moscow, 129337, Russian Federation; e-mail address: ICA_kbs@mgsu.ru)

KOROLCHENKO D. A., Candidate of Technical Sciences, Head of Department of Complex Safety in Construction, Moscow State University of Civil Engineering (Yaroslavskoye Shosse, 26, Moscow, 129337, Russian Federation; e-mail address: ICA_kbs@mgsu.ru)

KOROLCHENKO A. Ya., Doctor of Technical Sciences, Professor of Department of Complex Safety in Construction, Moscow State University of Civil Engineering (Yaroslavskoye Shosse, 26, Moscow, 129337, Russian Federation; e-mail address: ICA_kbs@mgsu.ru)

ABSTRACT

The model of economic evaluation and substantiation of choice of explosion-relief valves (ERV) as well as determination of efficiency of explosion protection of buildings and constructions organized during the construction stage is considered in this article. It is shown that the important role in design of explosive productions is played by choice of economically effective materials for ERV. It is noted that choose of any type of ERV should minimize full costs of its erection and exploitation taking into account probability of emergence explosions. The considered method allows selecting such materials for ERV which reduce full costs to minimum. The equation for economic evaluation of choice of ERV type allow to establish total costs of construction, exploitation and reconstruction of buildings taking into account probability of explosion. The analysis of this equation and further calculations show that for buildings equipped with remote and (or) automatic production control, where explosions occur at intervals of 12–15 years or more, decrease of ERV areas is economically justified. For optimization of explosion safety costs it is necessary to use probabilistic methods of determination of explosion possibility and to realize the relevant protective measures.

Keywords: explosion-relief valves; economically effective materials; explosion of production building; explosion safety; explosion safety costs; design of explosive productions.

REFERENCES

1. Beschastnov M. V., Sokolov V. M., Kats M. I. *Avarii v khimicheskikh proizvodstvakh i mery ikh preduprezhdeniya* [Accidents in chemical productions and measures of their prevention]. Moscow, Khimiya Publ., 1976. 367 p.
2. *Analiz avariyn, svyazannykh so vzryvmami v khimicheskoy promyshlennosti: nauchno-tekhnicheskiy otchet* [The analysis of accidents due to explosions in chemical industry. Scientific and technical report]. Severodvinsk, VNIITBKhP Publ., 1978. 22 p.
3. *Building codes 423–71. The instruction on determination of economic efficiency of capital investments in construction*. Moscow, Stroyizdat Publ., 1972 (in Russian).
4. Orlov G. G., Leybman A. Ye., Manasyan A. I. Opredeleniye ekonomicheskikh optimalnykh ploshchadey legkosbrasyvayemykh ograždayushchikh konstruktsey [Determination of economically optimal areas of explosion-relief valves]. *Okhrana truda v stroitelstve* [Labor protection in construction]. Moscow, Moscow State University of Civil Engineering Publ., 1978.
5. Sharovarnikov A. F., Korolchenko D. A. Ispolzovaniye generatorov peny vysokoy kratnosti dlya tushe-niya pozharov v skladskikh pomeshcheniyakh [Usage of high-expansion foam generators for extinguishing fires in warehouses]. *Nauchnoye obozreniye — Science Review*, 2014, no. 9, part 2, pp. 461–466.
6. Korolchenko D. A., Lukyanov A. M., Agapov A. G. O pozharoopasnosti drevesiny pri vozvedenii mostov [About the fire hazard of wood in the building of bridges]. *Mir transporta — World of Transport*, 2012, vol. 42, no. 4, p. 158.
7. Sharovarnikov A. F., Korolchenko D. A. Fighting fires of carbon dioxide in the closed buildings. *Applied Mechanics and Materials*, 2013, vol. 475–476, pp. 1344–1350. doi: 10.4028/www.scientific.net/amm.475-476.1344.
8. Korolchenko D. A., Gromovoy V. Yu., Vorogushin O. O. Primeneniye tonkoraspylennoy vody dlya tushe-niya pozharov v vysokikh zdaniyakh [Fire extinguishing in tall buildings by using water mist systems]. *Vestnik MGSU — Proceedings of Moscow State University of Civil Engineering*, 2011, no. 1-2, pp. 331–335.
9. Gorshkov V. I., Korolchenko D. A., Shebeko Yu. N., Navtsenya V. Yu., Kostyukhin A. K. The peculiarities of application of gas-aerosol fire extinguishing tools in various rooms. *Proceedings of Second International Seminar on Fire-and-Explosion Hazard of Substances and Venting of Deflagrations*. Moscow, All-Russian Research Institute for Fire Protection Publ., 1997, pp. 800–808.
10. Poddaeva O. I. Fizicheskiye issledovaniya arkhitekturno-stroitelnoy aerodinamiki dlya ustoychivogo proyektirovaniya v stroitelnoy otrasli [Physical studies of architectural and construction aerodynamics for steady design in construction branch]. *Promyshlennoye i grazhdanskoye stroitelstvo — Industrial and Civil Engineering*, 2013, no. 9, pp. 35–38.
11. Churin P., Poddaeva O. I. Aerodynamic testing of bridge structures. *Applied Mechanics and Materials*, 2013, vol. 477–478, pp. 817–821. doi: 10.4028/www.scientific.net/amm.477-478.817.
12. Borkovskaya V. G. Post bifurcations of the concept of the sustainable development in construction business and education. *Advanced Materials Research*, 2013, vol. 860–863, pp. 3009–3012. doi: 10.4028/www.scientific.net/AMR.860-863.3009.
13. Borkovskaya V. G. Standarty i trebovaniya pozharnoy bezopasnosti [Standards and requirements of fire safety]. *Aktualnyye problemy zashchity okruzhayushchey sredy i tekhnosfernoy bezopasnosti v menayushchikhsya antropogennykh usloviyakh. Materialy Mezhdunarodnoy nauchno-prakticheskoy konferentsii “Belye nochi 2014”* [Actual Problems of Environment Protection and Technosphere Safety in Changing Anthropogenous Conditions. Materials of the International Scientific and Practical Conference “White Nights 2014”]. Groznyy, 2014, p. 519.
14. Kholshchevnikov V. V., Parfenenko A. P. O modelirovanii evakuatsii lyudey i dinamiki opasnykh faktorov pozhara v tselyakh normirovaniya evakuatsionnykh putey [About modeling of evacuation of people and dynamics of fire hazards in purpose of normalization evacuation routes]. *Tekhnologii tekhnosfernoy bezopasnosti. Internet-zhurnal — Technologies of Technosphere Safety. Internet-Journal*, 2014, vol. 53, no. 1. 8 p.
15. Kholshchevnikov V. V., Parfenenko A. P. Modeli dvizheniya lyudskikh potokov v Rossii [Models of movement of pedestrian flows in Russia]. *Integratsiya, partnerstvo i innovatsii v stroitelnoy nauke i obrazovanii. Sbornik materialov Mezhdunarodnoy nauchno-prakticheskoy konferentsii* [Integration, Partnership and Innovations in Construction Science and Education. Collection of materials of International Scientific and Practical Conference]. Moscow, Moscow State University of Civil Engineering Publ., 2015, pp. 286–289.

Н. В. БАРАНОВСКИЙ, канд. физ.-мат. наук, доцент кафедры теоретической и промышленной теплотехники, Энергетический институт Национального исследовательского Томского политехнического университета (Россия, 634050, г. Томск, просп. Ленина, 30; e-mail: firedanger@narod.ru)

Д. В. КОРОБКИНА, магистрант кафедры теоретической и промышленной теплотехники, Энергетический институт Национального исследовательского Томского политехнического университета (Россия, 634050, г. Томск, просп. Ленина, 30; e-mail: korobkina.darya@mail.ru)

УДК 614.84

ЧИСЛЕННОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ПРОЦЕССОВ ТЕПЛОВОГО ВОЗДЕЙСТВИЯ ЛЕСНОГО ПОЖАРА НА КОЖНЫЕ ПОКРОВЫ ЧЕЛОВЕКА

Изучено воздействие теплового излучения на кожные покровы человека, находящегося вблизи очага пожара. Представлены результаты численного исследования такого воздействия как в одномерной, так и в двумерной постановках. Получены распределения температуры по толщине кожного покрова. Рассмотрен сценарий тепловых нагрузок низкой интенсивности. Разработана математическая модель теплопереноса в слоистой структуре кожного покрова с учетом наличия в ней неоднородностей. Представлены выводы по результатам моделирования с учетом структурных неоднородностей в кожном покрове.

Ключевые слова: лучистый тепловой поток; лесной пожар; кожные покровы; теплоперенос; математическая модель; структурная неоднородность.

Введение

Для оценки последствий воздействия на человека теплового излучения в чрезвычайных ситуациях (в том числе при лесных пожарах) могут применяться как отечественные, так и зарубежные методы, которые представляют собой количественные зависимости между термодинамическими и медицинскими критериями теплового поражения [1]. Большой объем расчетно-экспериментальных данных по термическим ожогам различной степени тяжести биообъекта накоплен в ведущих научно-исследовательских центрах NASA [1]. Основой для создания стандартных методов оценки поражения биообъектов послужили результаты обработки экспериментальных исследований. После проведения гармонизации отечественных и зарубежных методов прогнозирования теплового поражения в системе *тепловой источник – пакет одежды – человек* выделяются следующие методы прогнозирования [1]: инструментальные; расчетные; расчетно-экспериментальные. В настоящее время отсутствуют программные компоненты, реализующие развитые математические модели реальных теплофизических процессов, происходящих в кожных покровах и тканях человека [1]. Настоящая статья открывает перспективы в создании нового поколения медицинских информационных систем для нужд МЧС и скорой медицинской помощи при минимизации и ликвидации социального ущерба от лесных пожаров.

Цель исследования — численное исследование теплового воздействия на кожные покровы лучистого потока от лесных пожаров, в том числе с учетом структурной неоднородности кожного покрова.

Физико-математическая постановка задачи

Кожа имеет весьма сложное строение со своими особенностями в различных частях тела. Она состоит из трех слоев (рис. 1) — эпидермиса, дермы и подкожной клетчатки (гиподермы) [2].

Эпидермис включает в себя в основном мертвые клетки, которые действуют в качестве защитного барьера против влаги, ультрафиолетового излучения и высоких температур [3]. Через эпидермис проходят потовые железы. Толщина его различна — от 0,02–0,05 мм на шее и лице до 0,5–2,4 мм на ладонях и подошвах. Толщина дермы варьируется от 0,5 до 5 мм. Эпидермис и дерма, вместе взятые, имеют толщину около 1–2 мм. Ниже этих двух слоев лежит подкожная ткань — жировая клетчатка (гиподерма), которая содержит потовые железы и крупные кровеносные сосуды, дающие возможность коже приспособляться к местному нагреванию или охлаждению, но лишь в некоторых пределах [4]. Обычно кожу подразделяют на два типа — толстую и тонкую, что связано, главным образом, с различной толщиной эпидермиса. Толстая кожа покрывает ладони и

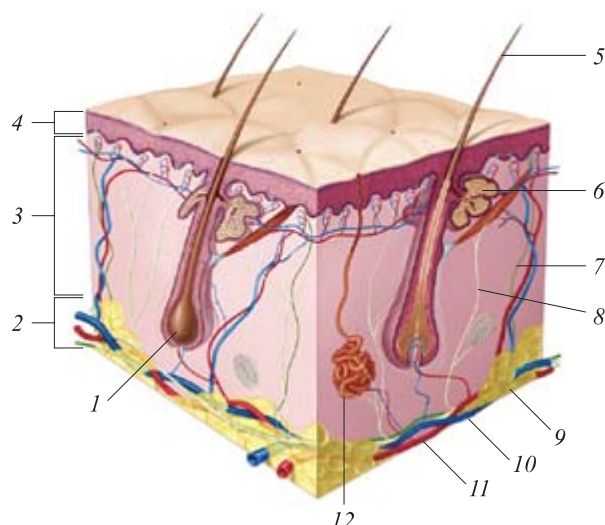


Рис. 1. Структура кожного покрова в общем случае: 1 — волосяная фолликула (луковица); 2 — гиподерма; 3 — дерма; 4 — эпидермис; 5 — стержень волоса; 6 — сальная железа; 7 — лимфатический сосуд; 8 — нерв; 9 — жировая ткань; 10 — вена; 11 — артерия; 12 — потовая железа

подошвы. Для нее характерно наличие толстого эпидермиса, на наружной поверхности которого располагается особенно мощный слой кератина.

При термической травме происходит первичное повреждение клеток, что выражается в нарушении их структуры и функций. При этом нарушается барьерная функция клеточных и внутриклеточных мембран, а также выключаются ионные насосы. Это, в свою очередь, сопровождается нарушением распределения веществ внутри клетки и между клеткой и окружающей средой, дезорганизацией внутриклеточного метаболизма и нарушением системы энергообеспечения [4].

При слабом тепловом излучении будет повреждаться только эпидермис на глубину 1 мм. Более интенсивный тепловой поток может привести к поражению не только эпидермиса, но и дермы, а излучение еще большей интенсивности будет воздействовать и на подкожный слой [3].

Степень тканевой гипертермии прямо пропорциональна продолжительности нагревания. Краткосрочное воздействие даже очень высоких температур может не вызвать развитие ожогов. Температурный оптимум активности ферментов составляет 36–37 °С. Чем выше степень перегрева тканей (начиная от 41 °С и выше), тем быстрее происходит гибель клеток.

Ожоги кожи имеют четыре степени тяжести в зависимости от глубины термического повреждения тканей кожи [5]:

- I — гиперемия и отек кожи;
- II — поражение поверхностных слоев эпидермиса с образованием пузырей, наполненных прозрачной субстанцией;

- IIIа — частичное поражение дермы с сохранением придатков кожи, из которых впоследствии происходит восстановление эпителия;
- IIIб — поражение кожи на всю толщу с частичным захватом подкожно-жировой клетчатки;
- IV — поражение глубоких структур (фасции, мышцы, кости).

При получении ожогов возможность выживания зависит от ряда факторов [5]:

- степени тяжести ожога;
- площади обожженной кожи, выражаемой в долях (%) от общей площади поверхности кожи;
- возраста;
- перенесенных болезней и состояния здоровья до происшествия.

Шансы выжить уменьшаются по мере увеличения площади ожога и с возрастом жертвы [5].

Среди основных характеристик теплового поражения человека от высокоинтенсивного нагрева выделяются [6, 7]:

- время возникновения термического ожога;
- количество поглощенной кожным покровом тепловой энергии;
- степень тяжести ожога;
- критическая температура основных структурных слоев кожного покрова.

По данным Министерства здравоохранения РФ ежегодно от ожогов страдает около 700 тыс. чел. В европейских странах от термических травм погибает около 60 тыс. чел. в год. Одной из причин смерти является ожоговый шок. Так, из всех погибших 28 % находились в ожоговом шоке, причем у 9 % ожоги составляли менее 20 % поверхности тела. При глубоких ожогах площадью более 20 % поверхности тела пострадавшего вероятность летального исхода возрастает до 82,2 %. Одной из главных причин высокой летальности среди пострадавших с тяжелыми ожогами является отсутствие единой концепции лечения этой категории пациентов. Для ее создания требуется более детальное изучение механизмов развития и течения ожогового шока, а также совершенствование протоколов ведения пациентов с тяжелыми термическими травмами. Такие травмы влекут за собой длительный период госпитализации, значительное число осложнений и высокую летальность [8].

Для задач численного моделирования кожные покровы можно условно представить в виде слоистой структуры с неоднородными включениями (например, волос и волосяная луковица). Геометрия области решения представлена на рис. 2 и 3. Теплоперенос в указанной системе описывается с помощью нестационарных дифференциальных уравнений теп-

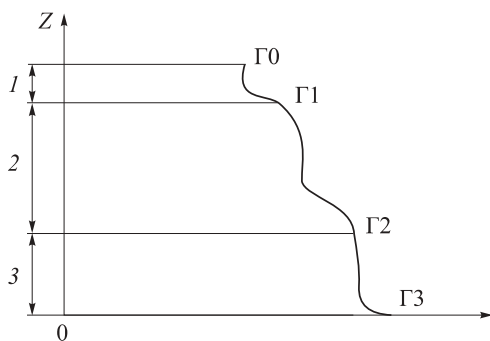


Рис. 2. Геометрия области решения для одномерной и двумерной постановки задачи о воздействии теплового излучения от лесного пожара на кожные покровы человека: 1 — эпидермис; 2 — дерма; 3 — гиподерма

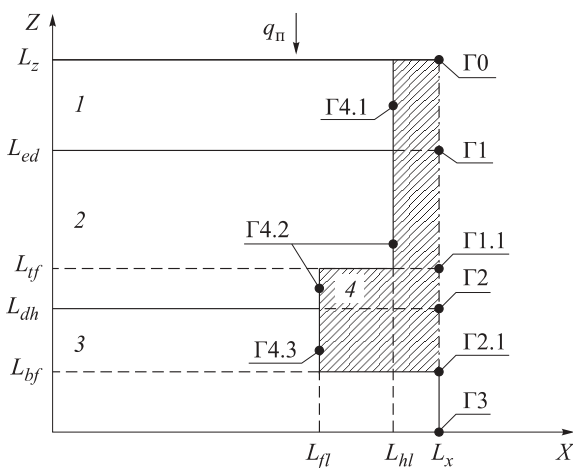


Рис. 3. Геометрия области решения для двумерной постановки задачи о воздействии теплового излучения от пожара на кожные покровы человека с учетом структурных неоднородностей: 1 — эпидермис; 2 — дерма; 3 — гиподерма; 4 — волос и волосяная луковица; L_z, L_x — границы области; L_{ed} — граница эпидермиса и дермы; L_{tf} — верхняя граница волосяной луковицы; L_{dh} — граница дермы и гиподермы; L_{bf} — нижняя граница волосяной луковицы; L_{fl} — левая граница волосяной луковицы; L_{hl} — левая граница волосяного стержня

лопроводности с соответствующими начальными и граничными условиями:

$$c_1 \rho_1 \frac{\partial T_1}{\partial t} = \lambda_1 \left(\frac{\partial^2 T_1}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T_1}{\partial z^2} \right); \quad (1)$$

$$c_2 \rho_2 \frac{\partial T_2}{\partial t} = \lambda_2 \left(\frac{\partial^2 T_2}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T_2}{\partial z^2} \right); \quad (2)$$

$$c_3 \rho_3 \frac{\partial T_3}{\partial t} = \lambda_3 \left(\frac{\partial^2 T_3}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T_3}{\partial z^2} \right); \quad (3)$$

$$c_4 \rho_4 \frac{\partial T_4}{\partial t} = \lambda_4 \left(\frac{\partial^2 T_4}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T_4}{\partial z^2} \right); \quad (4)$$

где c_i — удельная теплоемкость, Дж/(кг·К);
 ρ_i — плотность, кг/м³;

λ_i — коэффициент теплопроводности, Вт/(м·К);

T_i — температура кожного покрова, К;

1, 2, 3, 4 — индексы, соответствующие эпидермису, дерме, гиподерме и волосу и волосяной луковице;

t — время;

x, z — координаты.

Начальные условия:

$$t = 0, \quad T_i = T_0, \quad 0 \leq x \leq L_x, \quad 0 \leq z \leq L_z.$$

Условия на левой и правой границах расчетной области:

• $x = 0$:

$$\lambda_i \frac{\partial T}{\partial x} = 0, \quad t > 0;$$

• $x = L_x$:

$$\lambda_i \frac{\partial T}{\partial x} = 0, \quad t > 0.$$

На границе Г0 выставлены граничные условия 2-го рода в целях учета влияния лучистого теплового потока от фронта пожара:

• $z = L_z$:

$$\lambda_1 \frac{\partial T_1}{\partial x} = q_n; \quad \lambda_4 \frac{\partial T_4}{\partial x} = q_n,$$

где q_n — тепловой поток от фронта пожара, Вт/м²;

$q_n = f(d)$;

d — расстояние от кромки пожара, м.

На границах Г1, Г1.1, Г2 и Г2.1 используются граничные условия 4-го рода:

• Г1:

$$T_1(t, x, z) = T_2(t, x, z); \quad -\lambda_1 \frac{\partial T_1}{\partial z} = -\lambda_2 \frac{\partial T_2}{\partial z};$$

• Г1.1:

$$T_2(t, x, z) = T_4(t, x, z); \quad -\lambda_2 \frac{\partial T_2}{\partial z} = -\lambda_4 \frac{\partial T_4}{\partial z};$$

• Г2:

$$T_2(t, x, z) = T_3(t, x, z); \quad -\lambda_2 \frac{\partial T_2}{\partial z} = -\lambda_3 \frac{\partial T_3}{\partial z};$$

• Г2.1:

$$T_4(t, x, z) = T_3(t, x, z); \quad -\lambda_4 \frac{\partial T_4}{\partial z} = -\lambda_3 \frac{\partial T_3}{\partial z}.$$

На границе Г3 заданы три вида (варианта) различных граничных условий [9]:

а) $T_3 = T_{3i}$;

б) $\lambda_3 \frac{\partial T_3}{\partial x} = q_{вн}$;

в) $\alpha (T_e - T_3) = \lambda_3 \frac{\partial T_3}{\partial x}$,

где T_e — температура внутренней части гиподермы, К; $T_{3i} = T_e$;

$q_{вн}$ — внутреннее тепловыделение (тепловой поток от внутренней части организма), Вт/м²;

α — коэффициент теплопередачи, Вт/(м²·К).

На границе Г4 заданы следующие условия:

• Г4.1:

$$T_4(t, x, z) = T_1(t, x, z); \quad -\lambda_4 \frac{\partial T_4}{\partial x} = -\lambda_1 \frac{\partial T_1}{\partial x};$$

• Г4.2:

$$T_4(t, x, z) = T_2(t, x, z); \quad -\lambda_4 \frac{\partial T_4}{\partial x} = -\lambda_2 \frac{\partial T_2}{\partial x};$$

• Г4.3:

$$T_4(t, x, z) = T_3(t, x, z); \quad -\lambda_4 \frac{\partial T_4}{\partial x} = -\lambda_3 \frac{\partial T_3}{\partial x}.$$

Одномерная математическая модель теплопередачи в слоистой структуре кожного покрова получена редукцией двумерной математической модели по горизонтальной координате.

Результаты и их обсуждение

Численное моделирование проводилось для следующего сценария. Человек, лишенный средств индивидуальной защиты, находится на некотором расстоянии от фронта лесного пожара. В результате горения лесных горючих материалов происходит тепловыделение и передача тепла к телу человека посредством излучения. Для определенности рассматривается воздействие лучистого теплового потока на конкретную часть тела, а именно на фронтальную часть ладони человеческой руки. В табл. 1 приведены данные по принятым в вычислительных экспериментах толщинам слоев кожного покрова, а в табл. 2 — теплофизические характеристики каждого из этих слоев.

Была проведена численная реализация одномерной и двумерных математических моделей методом конечных разностей [10]. Разностные аналоги дифференциальных уравнений решены методом прогонки [10]. На основе разработанных алгоритмов созданы программные компоненты для определения температурного поля в слоистой структуре кожного покрова в условиях воздействия лучистого теплового потока.

Таблица 1. Принятая толщина слоев кожи [9]

Слой	Толщина, м
Эпидермис	0,0005
Дерма	0,0015
Гиподерма	0,0020

Таблица 2. Теплофизические свойства слоев кожи [9]

Слой	Плотность, кг/м ³	Теплоемкость, Дж/(кг·К)	Теплопроводность, Вт/(м·К)
Волос	1000	2930	0,450
Эпидермис	1200	3600	0,210
Дерма	1000	3200	0,498
Гиподерма	850	2250	0,200

На рис. 4 представлены результаты численного расчета распределения температуры по толщине кожного покрова в одномерной постановке, а на рис. 5 — в двумерной. Сравнительный анализ данных результатов позволяет сделать вывод о корректной работе представленных программных реализаций [11] математических моделей теплопереноса в слоистой структуре кожного покрова при воздействии лучистого теплового потока от фронта пожара [12]. Проведено сценарное моделирование для пожара низкой интенсивности и достаточно большого расстояния между кромкой пожара и человеком. Рассмотрен конкретный сценарий кратковременного воздействия длительностью 3 с при плотности лучистого теплового потока от фронта пожара 3000 Вт/м². На рис. 4 и 5 хорошо видно влияние различий в теплофизических характеристиках слоев кожного покрова на теплоперенос по вертикальной координате, особенно на границе дермы и гиподермы.

На рис. 6 представлены результаты численного расчета распределения температуры по толщине кожного покрова в двумерной постановке с учетом структурной неоднородности (волос и волосяная луковица). Сценарное моделирование проведено при тех же условиях, что и в одномерной постановке, а также в двумерной без неоднородных включений в структуре кожного покрова. В данном варианте учет горизонтальной координаты позволяет выявить дополнительные эффекты, связанные с наличием в кожном покрове структурных неоднородностей. А именно, наличие в составе кожного покрова структурных неоднородностей, таких как волос и волосяная луковица, изменяет его температурное поле при воздействии лучистого теплового потока от фронта пожара. В силу различных теплофизических характеристик в зоне нахождения волосяной луковицы формируется поле пониженной температуры, которое наблюдается также в области выхода волоса из кожного покрова. Наличие структурных неоднородностей приводит к формированию ячеистой структуры внутри и на поверхности кожного

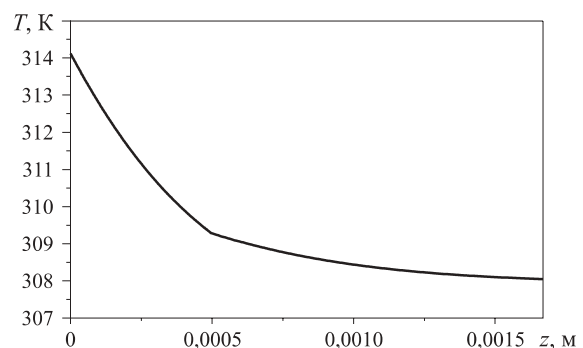


Рис. 4. Результаты численного расчета распределения температуры по толщине кожного покрова в одномерной постановке

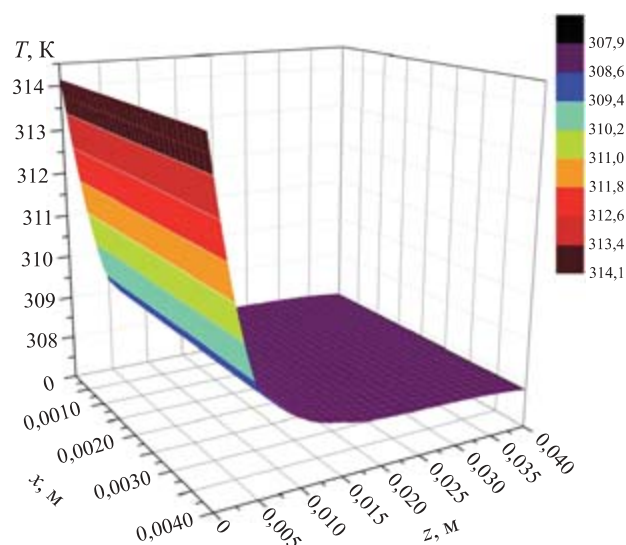


Рис. 5. Результаты численного расчета распределения температуры по толщине кожного покрова в двумерной постановке

покрова с пониженными значениями температур в ячейках. Следует отметить, что данный факт необходимо учитывать при разработке нового поколения противоожоговых медицинских средств и перевязочных материалов, а также при диагностике термических поражений [13, 14].

Заключение

Разработана новая математическая модель теплопереноса в слоистой структуре кожного покрова с учетом наличия в нем неоднородностей типа волосяной луковицы и волоса. Проведено численное исследование процесса теплопереноса для пожара низкой интенсивности и кратковременного воздей-

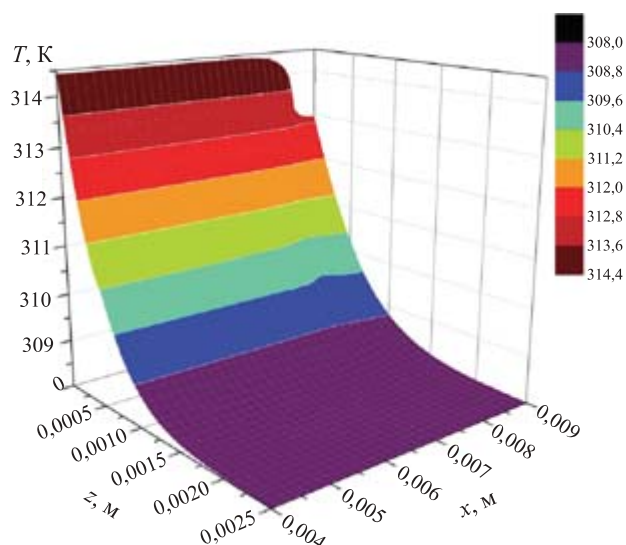


Рис. 6. Результаты численного расчета распределения температуры по толщине кожного покрова в двумерной постановке с учетом структурной неоднородности

ствия лучистого теплового потока от кромки лесного пожара. Следует отметить, что для дальнейшего сценарного моделирования могут быть использованы данные по контрольным выжиганиям, проведенным в окрестностях Красноярска сотрудниками Института леса СО РАН [12]. Созданы программные компоненты для моделирования процессов теплопереноса в слоистой структуре кожного покрова, которые могут быть применены при разработке нового поколения медицинских информационных систем [15, 16], а также для интеграции с геоинформационными системами прогноза лесной пожарной опасности [17, 18] на основе детерминированно-вероятностного подхода [19, 20].

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Коробкина Д. В., Барановский Н. В. Исследования теплового воздействия лесных пожаров на ткани человека: перспективы создания медицинских информационных систем // Cloud of Science. — 2014. — Т. 1, № 2. — С. 292–318.
2. Whitton J. T., Everall J. D. The thickness of the epidermis // Br. J. Dermatol. — 1973. — Vol. 89. — P. 467–476. doi: 10.1111/j.1365-2133.1973.tb03007.x.
3. Xu F., Lu T. J., Seffen K. A. Biothermomechanical behavior of skin tissue // Acta Mechanica Sinica. — 2008. — Vol. 24, No. 1. — P. 1–23. doi: 10.1007/s10409-007-0128-8.
4. Пушкарева А. Е. Лазерный селективный нагрев элементов кожной ткани : дис. ... канд. техн. наук. — СПб. : Санкт-Петербургский государственный университет информационных технологий, механики и оптики, 2006. — 151 с.
5. Парамонов Б. А., Порембский Я. О., Яблонский В. Г. Ожоги : Руководство для врачей. — СПб. : СпецЛит, 2000. — 480 с.
6. Быков В. Л. Частная гистология человека. — СПб. : Сотис, 2001. — С. 56–70.
7. Еналеев Р. Ш., Закиров А. М., Чистов Ю. С., Теляков Э. Ш. Термодинамические критерии теплового поражения человека в техногенных авариях // Вестник Казанского технологического университета. — 2012. — Т. 15, № 17. — С. 50–55.
8. Гольдзон М. А. Недостаточность кровообращения при тяжелой термической травме и ее патогенетическая коррекция : дис. ... канд. мед. наук. — Омск : Омская государственная медицинская академия, 2011. — 112 с.

9. Korobkina D. V., Baranovskiy N. V. Evaluation different boundary condition in depth of tissue for the task of mathematical simulation of heat transfer in human skin // MATEC Web of Conferences. — 2014. — Vol. 19, Article No. 01035. — P. 1–6. doi: 10.1051/mateconf/20141901035.
10. Самарский А. А. Теория разностных схем. — М. : Наука, 1983. — С. 33–36.
11. Архангельский А. Я. Программирование в Delphi для Windows: версии 2006, 2007, Turbo Delphi. — М. : Бинوم, 2010. — 1239 с.
12. Валендик Э. Н., Косов И. В. Влияние теплового излучения лесного пожара на окружающую среду // Сибирский экологический журнал. — 2008. — № 4. — С. 517–523.
13. Hummel A., Lyons K. Skin burn translation model for evaluating hand protection in flash fire exposures // Fire Technology. — 2014. — Vol. 50, No. 5. — P. 1285–1299. doi: 10.1007/s10694-013-0336-7.
14. Вильдиева М. В. Обоснование применения мексидипта в комплексном лечении больных с термической травмой : дис. ... канд. мед. наук. — Саранск : Мордовский государственный университет, 2009. — 116 с.
15. Petter S., Fruhling A. Evaluating the success of Emergency Response Medical Information Systems // International Journal of Medical Informatics. — 2011. — Vol. 80, No. 7. — P. 480–489. doi: 10.1016/j.ijmedinf.2011.03.010.
16. Bricon-Souff N., Verdier C., Flory A., Jaulent M. C. Theme C: Medical information systems and databases: results and future work // IRBM. — 2013. — Vol. 34. — P. 9–10. doi: 10.1016/j.irbm.2012.12.010.
17. Барановский Н. В., Смирнов В. В., Янкович Е. П. Мониторинг лесной пожарной опасности, обусловленной действием сфокусированного солнечного излучения с учетом данных прибора MODIS // Авиакосмическое приборостроение. — 2013. — № 10. — С. 7–15.
18. Барановский Н. В., Янкович Е. П. Оценка и картографирование лесной пожарной опасности, обусловленной действием сфокусированного солнечного излучения, в географической информационной системе // Приборы и системы. Управление. Контроль. Диагностика. — 2013. — № 12. — С. 8–15.
19. Барановский Н. В. Прогнозирование количества лесных пожаров // Пожарная безопасность. — 2007. — № 1. — С. 123–127.
20. Барановский Н. В. Ландшафтное распараллеливание и прогноз лесной пожарной опасности // Сибирский журнал вычислительной математики. — 2007. — Т. 10, № 2. — С. 141–152.

Материал поступил в редакцию 26 марта 2015 г.

English

NUMERICAL RESEARCH OF PROCESSES OF FOREST FIRE THERMAL INFLUENCE ON INTEGUMENTS OF THE PERSON

BARANOVSKIY N. V., Candidate of Physical and Mathematical Sciences, Associate Professor, Department of Theoretical and Industrial Heat Systems Engineering, Institute of Power Engineering, National Research Tomsk Polytechnic University (Lenina Avenue, 30, Tomsk, 634050, Russian Federation; e-mail address: firedanger@narod.ru)

KOROBKINA D. V., Master of Technique and Technology in Engineering, Department of Theoretical and Industrial Heat Systems Engineering, Institute of Power Engineering, National Research Tomsk Polytechnic University (Lenina Avenue, 30, Tomsk, 634050, Russian Federation; e-mail address: korobkina.darya@mail.ru)

ABSTRACT

For an estimation of thermal radiation influence consequences in extreme situations (including forest fires) foreign methods which represent quantitative dependences between thermodynamic and medical criteria of thermal defeat can be applied both domestic. Great volume of numerical-experimental data on thermal burns of various severity level of bio-object is saved up in leading research Centers NASA. Processing experimental research results have served as a basis for creation of standard methods of an estimation of bio-objects defeat. Following methods of forecasting are allocated after carrying out of harmonization of domestic and foreign methods of forecasting of thermal defeat for system *thermal source – package of clothes – person*: 1) tool; 2) numerical; 3) nu-

merical-experimental. Now there are no the program components realizing developed mathematical models of real thermophysical processes, occurring in integuments and tissues of the person. Present article opens prospects for creation of new generation of medical information systems for needs of the Ministry of Emergency Measures and the first help at minimization and liquidation of a social damage from forest fires.

Research objective is numerical research of thermal influence on integuments of a radiant flux from forest fires, taking into account structural heterogeneity of an integument.

The new mathematical model of heat transfer in layered structure of an integument with presence in it of heterogeneities type of a hair bulb and hair is developed in present article. Numerical research of heat transfer for the scenario of a fire of low intensity and short-term influence of a radiant thermal flux from a forest fire front is carried out. It is necessary to notice, that for further scenario modeling data on control burns, spent in vicinities of Krasnoyarsk employees of Institute of forest of the Siberian Branch of the Russian Academy of Science can be used. Program components for modeling of heat transfer processes in layered structure of an integument which can be applied by working out of new generation of medical information systems, and also for integration with geoinformation systems of the forecast of forest fire danger on the basis of the deterministic-probabilistic approach are created.

Keywords: radiant thermal flux; forest fire; integuments; heat transfer; mathematical model; structural heterogeneity.

REFERENCES

1. Korobkina D. V., Baranovskiy N. V. Issledovaniya teplovogo vozdeystviya lesnykh pozharov na tkani cheloveka: perspektivy sozdaniya meditsinskikh informatsionnykh sistem [Research of thermal influence of forest fires on a tissue of the person: prospects of creation of medical information systems]. *Cloud of Science*, 2014, vol. 1, no. 2, pp. 292–318.
2. Whitton J. T., Everall J. D. The thickness of the epidermis. *Br. J. Dermatol.*, 1973, vol. 89, pp. 467–476. doi: 10.1111/j.1365-2133.1973.tb03007.x.
3. Xu F., Lu T. J., Seffen K. A. Biothermomechanical behaviour of skin tissue. *Acta Mechanica Sinica*, 2008, vol. 24, no. 1, pp. 1–23. doi: 10.1007/s10409-007-0128-8.
4. Pushkareva A. E. *Lazernyy selektivnyy nagrev elementov kozhnoy tkani. Dis. kand. tekhn. nauk* [Laser selective heating of elements of a skin tissue. Cand. tech. sci. diss.]. Saint Petersburg, Saint Petersburg State University of Information Technologies, Mechanics and Optics Publ., 2006. 151 p.
5. Paramonov B. A., Poremskiy Yu. O., Yablonskiy V. G. *Ozhogi. Rukovodstvo dlya vrachey* [Burns: Management for doctors]. Saint Petersburg, SpecLit Publ., 2000. 480 p.
6. Bykov V. L. *Chastnaya gistologiya cheloveka* [Particular histology of the person]. Saint Petersburg, Sotis Publ., 2001, pp. 56–70.
7. Enaleev R. Sh., Zakirov A. M., Chistov Yu. S., Telyakov E. Sh. Termodinamicheskiye kriterii teplovogo porazheniya cheloveka v tekhnogennykh avariakh [Thermodynamic criteria of thermal defeat of the person in technogenic failures]. *Vestnik Kazanskogo tekhnologicheskogo universiteta — Herald of Kazan Technological University*, 2012, vol. 15, no. 17, pp. 50–55.
8. Goldzon M. A. *Nedostatochnost krovoobrashcheniya pri tyazheloy kosmicheskoy travme i yeye patogeneticheskaya korrektsiya. Dis. kand. med. nauk* [Insufficiency of blood circulation at a heavy thermal trauma and its pathogenetic correction. Cand. tech. sci. diss.]. Omsk, Omsk State Medical Academy Publ., 2011. 112 p.
9. Korobkina D. V., Baranovskiy N. V. Evaluation different boundary condition in depth of tissue for the task of mathematical simulation of heat transfer in human skin. *MATEC Web of Conferences*, 2014, vol. 19, article no. 01035, pp. 1–6. doi: 10.1051/mateconf/20141901035.
10. Samarskiy A. A. *Teoriya raznostnykh skhem* [Theory of finite difference schemes]. Moscow, Nauka Publ., 1983, pp. 33–36.
11. Arkhangelskiy A. Ya. *Programmirovaniye v Delphi dlya Windows: versii 2006, 2007, Turbo Delphi* [Programming in Delphi for Windows: versions 2006, 2007, Turbo Delphi]. Moscow, Binom Publ., 2010. 1239 p.
12. Valendik E. N., Kosov I. V. Vliyaniye teplovogo izlucheniya lesnogo pozhara na okruzhayushchuyu sredu [Influence of thermal radiation of forest fire on environment]. *Sibirskiy ekologicheskiy zhurnal — Siberian Ecological Journal*, 2008, no. 4, pp. 517–523.
13. Hummel A., Lyons K. Skin burn translation model for evaluating hand protection in flash fire exposures. *Fire Technology*, 2014, vol. 50, no. 5, pp. 1285–1299. doi: 10.1007/s10694-013-0336-7.

14. Vildieva M. V. *Obosnovaniye primeneniya meksidapta v kompleksnom lechenii bolnykh s termicheskoy travmoy. Dis. kand. med. nauk* [Basis of mexidapt application in complex treatment of patients with a thermal trauma. Cand. med. sci. diss.]. Saransk, Mordovian State University Publ., 2009. 116 p.
15. Petter S., Fruhling A. Evaluating the success of Emergency Response Medical Information Systems. *International Journal of Medical Informatics*, 2011, vol. 80, no. 7, pp. 480–489. doi: 10.1016/j.ijmedinf.2011.03.010.
16. Bricon-Souf N., Verdier C., Flory A., Jaulent M. C. Theme C: Medical information systems and databases: results and future work. *IRBM*, 2013, vol. 34, pp. 9–10. doi: 10.1016/j.irbm.2012.12.010.
17. Baranovskiy N. V., Smirnov V. V., Yankovich E. P. Monitoring lesnoy pozharney opasnosti, obuslovlennoy deystviyem sfokusirovannogo solnechnogo izlucheniya s uchetom dannykh pribora MODIS [Monitoring of the forest fire danger caused by action of the focused sunlight taking into account data of device MODIS]. *Aviakosmicheskoye priborostroyeniye — Aerospace Instrument Making*, 2013, no. 10, pp. 7–15.
18. Baranovskiy N. V., Yankovich E. P. Otsenka i kartografirovaniye lesnoy pozharney opasnosti, obuslovlennoy deystviyem sfokusirovannogo solnechnogo izlucheniya, v geograficheskoy informatsionnoy sisteme [Estimation and mapping of the forest fire danger caused by action of the focused sunlight, in geographical information system]. *Pribory i sistemy. Upravleniye. Kontrol. Diagnostika — Devices and Systems. Management. Control. Diagnostics*, 2013, no. 12, pp. 8–15.
19. Baranovskiy N. V. Prognozirovaniye kolichestva lesnykh pozharov [Forecasting of forest fire quantity]. *Pozharnaya bezopasnost — Fire Safety*, 2007, no. 1, pp. 123–127.
20. Baranovskiy N. V. Landshaftnoye rasparallelivaniye i prognoz lesnoy pozharney opasnosti [Landscape parallelization and forecast of forest fire danger]. *Sibirskiy zhurnal vychislitel'noy matematiki — Siberian Journal of Numerical Mathematics*, 2007, vol. 10, no. 2, pp. 141–152.



Издательство «ПОЖНАУКА»

Предлагает книги

А. Я. Корольченко, Д. О. Загорский КАТЕГОРИРОВАНИЕ ПОМЕЩЕНИЙ И ЗДАНИЙ ПО ВЗРЫВОПОЖАРНОЙ И ПОЖАРНОЙ ОПАСНОСТИ



В учебном пособии изложены принципы категорирования помещений и зданий по взрывопожарной и пожарной опасности, содержащиеся в современных нормативных документах. На примерах конкретных помещений рассмотрено использование требований нормативных документов к установлению категорий. Показана возможность изменения категорий помещений путем изменения технологии или внедрения инженерных мероприятий по снижению уровня взрывопожароопасности и повышению надежности технологического оборудования и процессов.

Пособие рассчитано на студентов высших учебных заведений, обучающихся по специальностям «Пожарная безопасность», «Безопасность технологических процессов и производств», «Безопасность жизнедеятельности в техносфере», студентов строительных вузов и факультетов, обучающихся по специальности «Промышленное и гражданское строительство», сотрудников научно-исследовательских, проектных организаций и нормативно-технических служб, ответственных за обеспечение пожарной безопасности.

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

З. С.-А. АЙБУЕВ, канд. техн. наук, доцент кафедры “Архитектура”, Грозненский государственный нефтяной технический университет им. академика М. Д. Миллионщикова (Россия, 361051, Чеченская Республика, г. Грозный, пл. Орджоникидзе, 100; e-mail: zemaish@mail.ru)

И. И. ИСАЕВИЧ, канд. техн. наук, доцент кафедры архитектурно-строительного проектирования, Ульяновский государственный технический университет (Россия, 432027, г. Ульяновск, ул. Северный Венец, 32; e-mail: isaevichnew@mail.ru)

М. В. МЕДЯНИК, старший преподаватель кафедры комплексной безопасности в строительстве, Московский государственный строительный университет (Россия, 129337, г. Москва, Ярославское шоссе, 26; e-mail: mihalmed@yandex.ru)

УДК 614.842

СВОБОДНОЕ ДВИЖЕНИЕ ЛЮДЕЙ В ПОТОКЕ И ПРОБЛЕМЫ ИНДИВИДУАЛЬНО-ПОТОЧНОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ

Рассмотрены основные особенности использования индивидуально-поточного моделирования при эвакуации людей в зданиях и сооружениях. Рассмотрены также основные показатели людского потока, характерные для индивидуально-поточного моделирования. Проведен краткий обзор моделей, применяемых в существующих программно-вычислительных комплексах по эвакуации людей. Рассмотрены методологические основы моделирования движения людских потоков при эвакуации и при разработке индивидуально-поточных моделей. Выполнена оценка валидности результатов моделирования.

Ключевые слова: моделирование; эвакуация; людской поток; пожар; безопасность людей; индивидуальный пожарный риск.

На фоне всеобщей компьютеризации в области исследования людских потоков эпизодически появлялись программы индивидуально-поточного движения людей, разработчики которых, как показывают обзоры [1, 2], из-за незнания закономерностей движения людских потоков подменяли их моделями процессов иной физической природы: потоков жидкости или сыпучих тел, электронных вызовов, движения металлических частиц в магнитном поле [3–5]. Несмотря на показанную некорректность подобных аналогий [6, 7], они появляются и сегодня, в частности в виде аналогии с действием центробежных механических или неких “социальных” сил [8].

Однако известно, что аналогия является единственным видом умозаключений (индукция, дедукция), в котором выводы (результаты) относятся к объектам иного вида, чем те, которые послужили его прообразом, предпосылкой. Поэтому переход к моделированию стадии поточного движения при пожаре [9–13] всегда требует проверки его корректности на основе оценки соответствия используемых в предлагаемой индивидуально-поточной модели зависимостей между параметрами людских потоков установленным закономерностям связи между ними [14].

Стадия же индивидуального движения, когда воздействие факторов поточного движения еще не ощу-

щается человеком, остается, казалось бы, вне сферы валидации. На самом деле, результаты этой стадии моделирования индивидуально-поточного движения людей могут быть оценены на основе известных методов теории вероятностей, которые получили практическую апробацию при исследованиях свободного движения людских потоков. В свете изложенного представляется актуальным рассмотреть их в целях оценки корректности разрабатываемых компьютерных моделей индивидуально-поточного движения, которые претендуют на управление эвакуацией людей и на использование при оценке пожарного риска.

Актуальность индивидуально-поточных моделей мотивируется необходимостью пристального внимания к движению людей с ограниченными мобильными возможностями [15] в потоке смешанного состава в общественных зданиях достаточно обширной номенклатуры и разных классов функциональной пожарной опасности. Само название модели “индивидуально-поточная” говорит о том, что область ее действия включает две ситуации:

- ничто не препятствует реализации индивидуальных возможностей человека в его потребности в движении с целью достичь необходимого ему на данный момент результата;

- люди, передвигающиеся одновременно с человеком в потоке, мешают ему это делать в соответствии с его возможностями и желаемым комфортом передвижения.

Первая ситуация является исходной, поскольку она определяет те условия, в которых наиболее полно, неограниченно реализуются индивидуальные возможности и желание человека свободно двигаться с желаемой скоростью к достижению цели, имеющейся у него на данный момент. Следовательно, первоочередной задачей для индивидуально-поточной модели становится определение размеров коммуникационных путей, которые могут обеспечить человеку ощущение свободы передвижения. Это требует определения плотности потока D_{0j} , которая не оказывает влияния на изменение желаемой каждым (k -м) человеком скорости свободного движения по тому или иному (j -му) виду пути — $V_{jD_j}^{zk}$, т. е. определения размеров зоны свободного движения, которая устанавливается индивидуально каждым человеком.

Определение плотности, при которой возможно индивидуальное свободное движение людей в потоке

Как неоднократно отмечалось [16–19], значения D_{0j} зависят от вида пути, физических (связанных с возрастом) и психофизиологических возможностей людей. Например, при движении по горизонтальному пути в потоке детей дошкольного возраста D_0 составляет 0,78 чел./м², молодых людей — 0,72 чел./м², престарелых — 0,96 чел./м², смешанного состава в зданиях — от 0,51 до 0,57 чел./м², вне зданий — 0,89 чел./м².

Однако человек реагирует не на показатель плотности потока, а на то, что он может воспринять через дистанционные рецепторы своих органов чувств (зрения, слуха). В данном случае это — расстояние до ближайшего человека, поэтому от плотности потока нужно перейти к расстоянию. Такой переход можно осуществить в два этапа. Прежде всего заметим, что поскольку под плотностью потока понимается число человек, приходящееся на 1 м², то по ширине пути размещается n “элементарных” потоков [20], каждый из которых имеет ширину C (м), равную ширине проекции тела человека: $n = 1/C$. В этом потоке линейная плотность размещения людей вдоль потока D_{0l} эквивалентна D_0 и составляет: $D_{0l} = nD_0 = D_0/C$.

При ширине “элементарного” потока 0,5 м его линейная плотность D_{0l} соответствует $D_0 = 0,5$ чел./м². Для потока смешанного состава на горизонтальном пути в здании она составляет приблизительно 1 чел./м². Перейдя от плотности к расстоянию между людьми в элементарном потоке $l_0 = 1/D_{0l}$, полу-

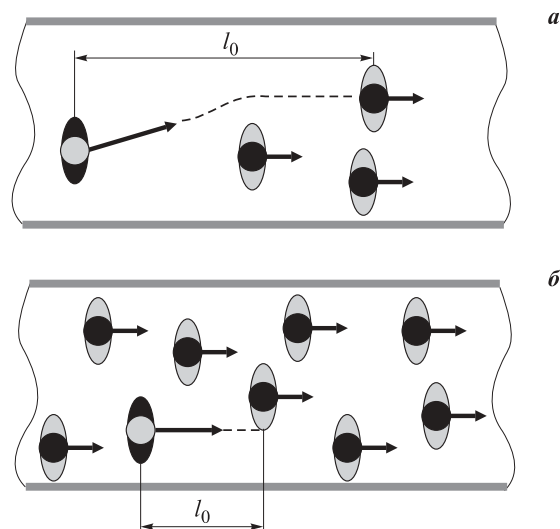


Рис. 1. Оценка расстояния между людьми l_0 при возможности (а) и невозможности (б) совершения обгона

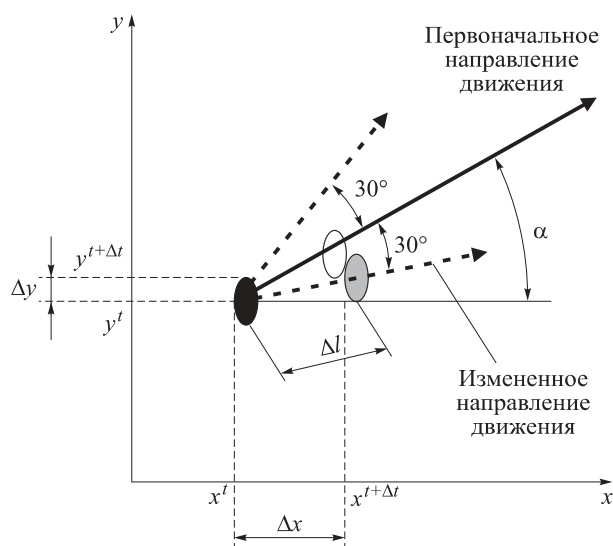


Рис. 2. Определение координат человека при изменении направления движения

чаем: $l_0 = C/D_0$. При этом следует иметь в виду, что человек из-за возможности пересечения траектории его движения другими маневрирующими людьми обеспечивает перед собой “буферную” зону [21]. Есть основания полагать [22], что, готовясь к маневру по изменению траектории движения, человек оценивает необходимый для этого участок пути, ориентируясь на человека, идущего впереди него (рис. 1).

Как показывают натурные наблюдения [23–26], угол отклонения траектории обгона человеком от прямого направления составляет около 30° (рис. 2). Тогда длина участка пути обгона составляет около 1,5 м, и человек проходит ее со скоростью $V_{jD_0}^{zk}$, превышающей характерную для него скорость при том уровне эмоционального состояния, в котором он находится.

Индивидуальная скорость свободного движения

Следующий вопрос, который приходится решать разработчикам индивидуально-поточных моделей, состоит в том, какую индивидуальную скорость свободного движения человека $V_{jD_0}^{jk}$ следует принимать в качестве расчетной. Здесь важно понимать, что значение этой скорости зависит от уровня эмоционального состояния и индивидуальных физических возможностей конкретного человека. Натурными наблюдениями было показано [16, 27, 28], что определяющее влияние на уровень эмоционального состояния человека при его свободном движении в потоке оказывает дефицит времени, например при движении в метрополитене в утренний час пик [16] и по предзаводской территории в начале рабочей смены [27]. Возможность же реализации желаемой скорости, определяемой эмоциональным состоянием, зависит от индивидуального физического состояния человека. Поэтому наиболее соответствует реальности рассмотрение скорости свободного движения каждого человека $V_{jD_0}^{jk}$ как одного из значений совокупности значений случайной величины скорости свободного движения $f(V)$.

Определение индивидуального местоположения человека на участке пути при свободном движении

При моделировании индивидуального движения человека в потоке время достижения им расчетного сечения пути, например контрольно-пропускного пункта на территорию предприятия или на остановочный пункт общественного транспорта в городском транспортно-коммуникационном узле [27, 29, 30], должно соответствовать его значению в распределении времени прихода всей рассматриваемой группы людей в это сечение $f_i(t)$. Его местоположение на пути движения к этому пункту в любой момент времени t также определяется распределением людей по длине пути в этот момент времени $f_i(l)$.

В этом случае распределение людей в потоке по длине пути и времени их прихода в любое его сечение определяется чисто вероятностными методами, поскольку они являются случайными функциями от аргумента $f(V)$, подчиненного нормальному распределению:

$$f(V) = \frac{1}{S_V \sqrt{2\pi}} e^{(V - \bar{V})^2 / (2S_V^2)}, \quad (1)$$

где S_V — среднее квадратичное отклонение скорости движения людей в потоке;
 $\bar{V}$ — математическое ожидание скорости движения людей в потоке.

При движении поток людей растекается. Соответственно этому процессу распределение людей в момент t по длине пути описывается функцией

$$f_i(l) = \frac{1}{t S_V \sqrt{2\pi}} e^{(l/t - \bar{V})^2 / (2S_V^2)}, \quad (2)$$

а время пересечения людьми поперечного сечения пути, находящегося на расстоянии l от источника, — функцией

$$f_i(t) = \frac{1}{t^2 S_V \sqrt{2\pi}} e^{(l/t - \bar{V})^2 / (2S_V^2)}. \quad (3)$$

Графики распределений плотности вероятности, определяемых формулами (2) и (3), приведены на рис. 3.

Изменение распределения людей в последовательные моменты времени по длине пути (2) соответствует кинематике людского потока при плотностях возможного индивидуально-поточного движения, которая характеризуется растеканием, т. е. растеканию потока из-за разных индивидуальных скоростей движения людей в нем (рис. 4).

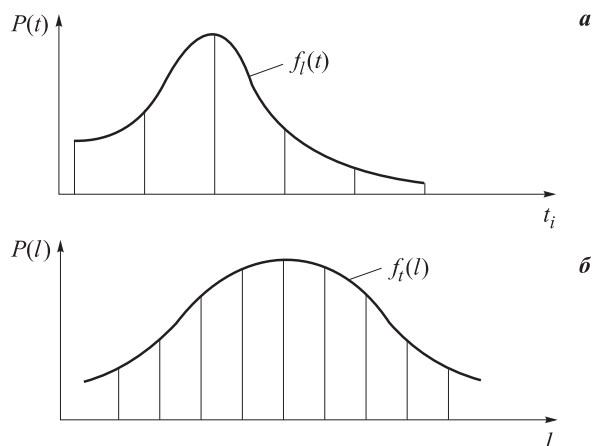


Рис. 3. Распределение плотности вероятностей значений времени прихода людей в сечение пути $f_i(t)$ (а) и вероятности значений плотности потока $f_i(l)$ (б) в сечении пути l в момент времени t

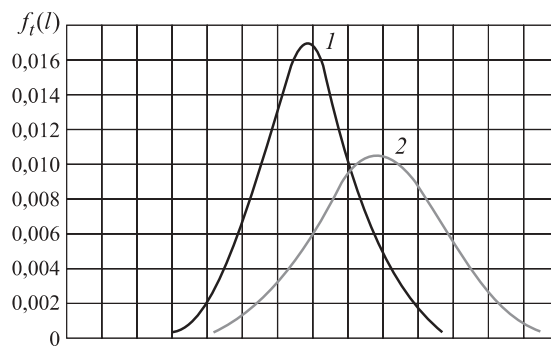


Рис. 4. Пример изменения плотности вероятности распределения людей по длине пути в последовательные моменты времени t : 1 — 1 мин; 2 — 2 мин [31]

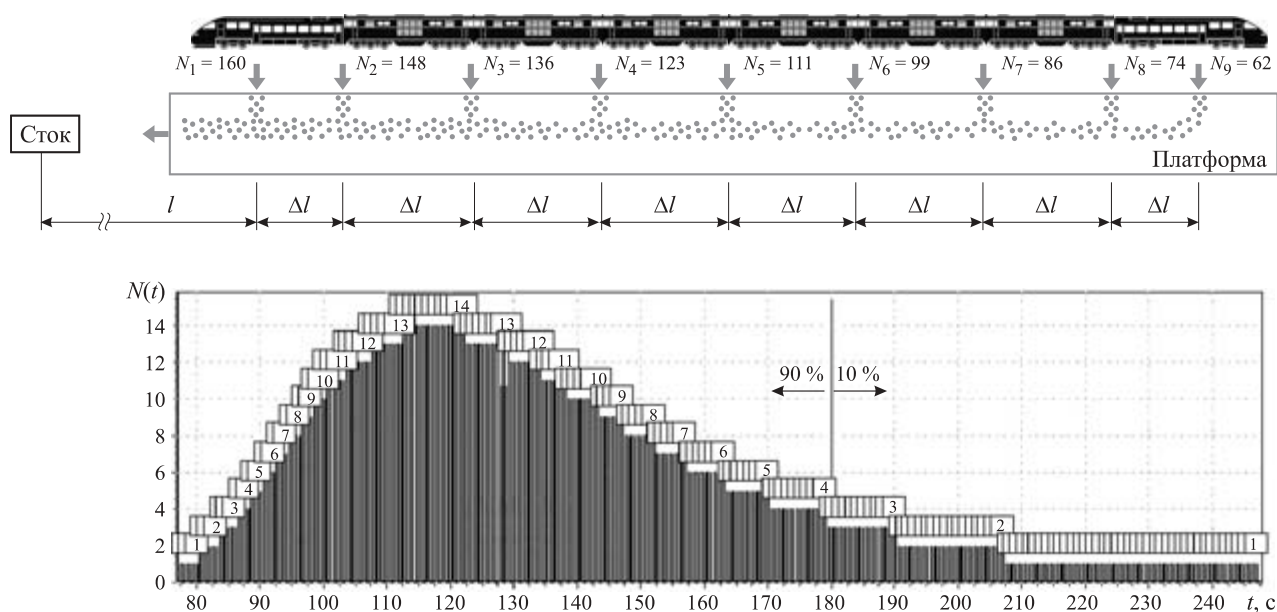


Рис. 5. Расчетная схема (а) и график (б) распределения времени прихода людей на остановку городского транспорта при $l = 200$ м

Для простых ситуаций эти распределения могут быть построены даже ручным способом [29]. Стохастические закономерности формирования распределений значений параметров свободного движения людей при различных режимах функционирования их источников давно подробно описаны [32–35].

Для описания свободного движения людских потоков по участкам пути с многочисленными узлами пересечения и при большом количестве источ-

ников в свое время была создана модель SDLP (Свободное движение людских потоков) [28]. Сегодня она реализуется разработанной в 2011 г. программой FMT 1.0, получившей государственную регистрацию [32, 36, 37].

Пример использования программы FMT 1.0 для определения времени прихода людей из многочисленных источников на остановку городского транспорта приведен на рис. 5.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Холщевников В. В., Самошин Д. А., Галушка Н. Н. Обзор компьютерных программ моделирования эвакуации зданий и сооружений // Пожаровзрывобезопасность. — 2002. — Т. 11, № 5. — С. 40–49.
2. Парфененко А. П. Методология моделирования людских потоков и практика программирования их движения при эвакуации // Пожаровзрывобезопасность. — 2014. — Т. 23, № 12. — С. 46–55.
3. Henderson L. F. On the fluid mechanics of human crowd motion // Transportation Research. — 1974. — Vol. 8, No. 6. — P. 509–515. doi: 10.1016/0041-1647(74)90027-6.
4. Okazaki S. A study of pedestrian movement in architectural space // Fire Research and Safety. 4th Joint Panel Meeting of the UJNR Panel. Tokyo, Japan, 5–9 February 1979.
5. Генуев Г. А. О некоторых закономерностях движения сплошных людских потоков // Исследования по теории и методам расчета строительных конструкций : сб. науч. тр. — М. : ЦНИИСК, 1984. — С. 17–30.
6. Хейт Ф. Математическая теория транспортных потоков / Пер. с англ. — М. : Мир, 1966. — 288 с.
7. Холщевников В. В. Моделирование людских потоков // Моделирование пожаров и взрывов / Под общ. ред. Н. Н. Брушлинского, А. Я. Корольченко. — М. : Пожнаука, 2000. — С. 139–169.
8. Шихалев Д. В., Хабибуллин Р. Ш. Математическая модель определения направлений безопасной эвакуации людей при пожаре // Пожаровзрывобезопасность. — 2014. — Т. 23, № 4. — С. 51–60.
9. Корольченко Д. А., Шароварников А. Ф. Физические параметры пены высокой кратности, используемой при тушении пожаров в закрытых помещениях // Вестник МГСУ. — 2015. — № 2. — С. 85–92.
10. Korolchenko D. A., Sharovarnikov A. F., Byakov A. V. The analysis of oil suppression by aqueous film forming foam through a gas-salt layer of water // Advanced Materials Research. — 2014. — Vol. 1073–1076. — P. 2353–2357. doi: 10.4028/www.scientific.net/amr.1073-1076.2353.
11. Korolchenko D. A., Sharovarnikov A. F. Heat balance of extinguishing process of flammable liquid by sprayed water // Advanced Materials Research. — 2014. — Vol. 1070–1072. — P. 1794–1798. doi: 10.4028/www.scientific.net/amr.1070-1072.1794.

12. Шароварников А. Ф., Корольченко Д. А. Использование генераторов пены высокой кратности для тушения пожаров в складских помещениях // Научное обозрение. — 2014. — № 9, ч. 2. — С. 461–466.
13. Sharovarnikov A. F., Korolchenko D. A. Fighting fires of carbon dioxide in the closed buildings // Applied Mechanics and Materials. — 2013. — Vol. 475–476. — P. 1344–1350. doi: 10.4028/www.scientific.net/amm.475-476.1344.
14. Холицевников В. В. Закономерность 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., Самошин Д. А., Истратов Р. Н. Исследование проблем обеспечения пожарной безопасности людей с нарушением зрения, слуха и опорно-двигательного аппарата // Пожаровзрывобезопасность. — 2013. — Т. 22, № 3. — С. 48–56.
16. Исаевич И. И. Разработка основ многовариантного анализа планировочных решений станций и пересадочных узлов метрополитена на основе моделирования движения людских потоков : дис. ... канд. техн. наук. — М. : МИСИ, 1990. — 245 с.
17. Парфененко А. П. Нормирование требований пожарной безопасности к эвакуационным путям и выходам в зданиях детских дошкольных образовательных учреждений : дис. ... канд. техн. наук. — М. : АГПС МЧС РФ, 2012. — 153 с.
18. Кудрин И. С. Влияние параметров движения людских потоков при пожаре на объемно-планировочные решения высотных зданий : дис. ... канд. техн. наук. — М. : АГПС МЧС РФ, 2013. — 190 с.
19. 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. : АГПС МЧС РФ, 2014. — 160 с.
20. Беляев С. В. Эвакуация зданий массового назначения. — М. : Изд. Всесоюзной академии архитектуры, 1938. — 72 с.
21. Fruin J. J. Pedestrian planning and design. — New-York : Elevator World, 1971.
22. Kholshchikov V. V., Shields T. J., Samoshyn D. A. Foot traffic flows: background for modeling // Proceedings of the Second International Conference on Pedestrian and Evacuation Dynamics. University of Greenwich, 20–22 August 2003 / Galea E. R. (ed.). — London, U. K. : University of Greenwich, 2003. — P. 410.
23. Ромм А. П. Использование количественных методов при построении системы пешеходных путей в микрорайоне // В помощь проектировщику-градостроителю. Вып. 2. Математические методы в градостроительстве. — Киев : Будівельник, 1969. — С. 41–54.
24. Методические рекомендации по проектированию пешеходных сетей. — Введ. 16.04.1987. — М. : ЦНИИП градостроительства, 1988.
25. Холицевников В. В., Овсянников А. Н. Закономерности маршрутизации потоков в зрительных сооружениях // Исследования по функциональным, физико-техническим и эстетическим проблемам архитектуры : сб. науч. тр. — Томск : Изд-во Том. гос. ун-та, 1988. — С. 131–140.
26. Issaevich I. The modeling of a person movement in free-planned locations of communal buildings // Neue Technologien in Bauwesen. Proceedings of Russian-German Scientific Conference devoted to 10-years Cooperation of Ulyanovsk State Technical University and Darmstadt University of Applied Sciences. — Ulyanovsk : Ulyanovsk State Technical University, 2008. — 426 p.
27. Айбуев З. С.-А. Формирование людских потоков на предзаводских территориях крупных промышленных узлов машиностроительного профиля : дис. ... канд. техн. наук. — М. : МИСИ, 1989. — 243 с.
28. Холицевников В. В. Людские потоки в зданиях, сооружениях и на территории их комплексов : дис. ... д-ра техн. наук. — М. : МИСИ, 1983. — 442 с.
29. Сопеловская А. А. Формирование транспортных и пешеходных потоков в пересадочных узлах пригородно-городского сообщения : дис. ... канд. техн. наук. — М. : МИСИ, 1980. — 272 с.
30. Холицевников В. В. Расчет оптимальных вариантов пешеходных путей в городских узлах // На стройках России. — 1983. — № 3. — С. 15–17.
31. Холицевников В. В., Левин Ю. П., Никонов С. А. Расчет и моделирование движения людских потоков // Исследования по основам архитектурного проектирования : сб. науч. тр. — Томск : Изд-во Том. гос. ун-та, 1983. — С. 7–28.
32. Холицевников В. В., Айбуев З. С.-А. Стохастическая модель движения людского потока и ее проверка при функционировании одного источника людского потока // Депониров. № 10447 ВНИИНТПИ. — 1990. — Вып. 3.

33. Холщевников В. В., Айбуев З. С.-А. Проверка модели при длительно-функционирующих источниках // Депониров. № 10448 ВНИИТПИ. — 1990. — Вып. 3.
34. Холщевников В. В., Айбуев З. С.-А. Развитие подхода к моделированию свободного движения людских потоков // Депониров. № 10449 ВНИИТПИ. — 1990. — Вып. 3.
35. Холщевников В. В., Айбуев З. С.-А. Определение статистических характеристик распределения вероятности скорости свободного движения // Депониров. № 10450 ВНИИТПИ. — 1990. — Вып. 3.
36. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2011614752 от 17.06.2011. Программа FMT 1.0 / Шишов И. А., Холщевников В. В. — М. : Федеральная служба по интеллектуальной собственности (Роспатент), 2011.
37. Холщевников В. В., Шишов И. А. Моделирование свободного движения людских потоков // Вестник Томского государственного архитектурно-строительного университета. — 2011. — № 2. — С. 89–103.

Материал поступил в редакцию 15 марта 2015 г.

English

FREE MOVEMENT OF PEOPLE IN A STREAM AND PROBLEMS OF INDIVIDUAL AND LINE MODELING

AYBUEV Z. S.-A., Candidate of Technical Sciences, Docent of "Architecture" Department, Grozny State Oil Technical University named after academician M. D. Millionshchikov (Ordzhonikidze square, 100, Grozny, Chechen Republic, 361051, Russian Federation; e-mail address: zemaism@mail.ru)

ISAEVICH I. I., Candidate of Technical Sciences, Docent of Architecture and Construction Development Department, Ulyanovsk State Technical University (Severnny Venetz street, 32, Ulyanovsk, 432027, Russian Federation; e-mail address: isaevichnew@mail.ru)

MEDYANIK M. V., Senior Tutor, Department of Complex Safety in Construction, Moscow State University of Civil Engineering (Yaroslavskoye Shosse, 26, Moscow, 129337, Russian Federation; e-mail address: mihalmmed@yandex.ru)

ABSTRACT

The free movement of people in a flow is a special case of the movement of human flows in buildings, constructions and in the territory of their complexes. Here the fullest manifestation of individual qualities of each person that defines probability of values of parameters of their movement is possible. They don't depend on influence of density of a human flow. The given provisions and probabilistic methods of modeling of the free movement of people give objective initial criteria of a correctness of individual and line models and the programs realizing them. As in the absence of influence of density of distribution of people on length of a way and time of their arrival to its concrete section are functions of casual argument — speeds of the movement of people, any individual and line model has to correspond at the free movement to well-known methods of probability theory. Check of individual and line model on compliance to these methods is paramount criterion of its correctness. Without performance of this criterion further consideration of any individual and line model, as if it didn't imitate influence of density of a stream on the movement of people, loses meaning.

Keywords: modeling; evacuation; flow of people; fire; safety of people; individual fire risk.

REFERENCES

1. Kholshchevnikov V. V., Samoshin D. A., Galushka N. N. Obzor kompyuternykh programm modelirovaniya evakuatsii zdaniy i sooruzheniy [Review of computer simulation models for computation build environment evacuation]. *Pozharovzryvobezopasnost — Fire and Explosion Safety*, 2002, vol. 11, no. 5, pp. 40–49.
2. Parfenenko A. P. Metodologiya modelirovaniya lyudskikh potokov i praktika programmirovaniya ikh dvizheniya pri evakuatsii [Methodology for modeling human movements and practice of programming their movement during evacuation] *Pozharovzryvobezopasnost — Fire and Explosion Safety*, 2014, vol. 23, no. 12, pp. 46–55.
3. Henderson L. F. On the fluid mechanics of human crowd motion. *Transportation Research*, 1974, vol. 8, no. 6, pp. 509–515. doi: 10.1016/0041-1647(74)90027-6.

4. Okazaki S. A study of pedestrian movement in architectural space. *Fire Research and Safety. 4th Joint Panel Meeting of the UJNR Panel*. Tokyo, Japan, 5–9 February 1979.
5. Geniev G. A. O nekotorykh zakonomernostyakh dvizheniya sploshnykh lyudskikh potokov [About some regularities of the movement of continuous human flows]. *Issledovaniya po teorii i metodam rascheta stroitelnykh konstruksiy* [Researches on the theory and methods of calculation of construction designs]. Moscow, Central Research Institute of Construction Designs Publ., 1984, pp. 17–30.
6. Haight F. A. *Mathematical theories of traffic flow*. New York, London, Academic Press, 1963. 255 p. (Russ. ed.: Kheif F. Matematicheskaya teoriya transportnykh potokov. Moscow, Mir Publ., 1966. 288 p.).
7. Kholshchevnikov V. V. Modelirovaniye lyudskikh potokov [Modeling of human flows]. In: Brushlinskiy N. N., Korolchenko A. Ya. (eds). *Modelirovaniye pozharov i vzryvov* [Modeling of the fires and explosions]. Moscow, Pozhnauka Publ., 2000, pp. 139–169.
8. Shikhalev D. V., Khabibulin R. Sh. Matematicheskaya model opredeleniya napravleniy bezopasnoy evakuatsii lyudey pri pozhare [Mathematical model of definition of safe evacuation directions in case of fire]. *Pozharovzryvbezopasnost — Fire and Explosion Safety*, 2014, vol. 23, no. 4, pp. 51–60.
9. Korolchenko D. A., Sharovarnikov A. F. Fizicheskiye parametry peny vysokoy kratnosti, ispolzuyemoy pri tushenii pozharov v zakrytykh pomeshcheniyakh [Physical parameters of high expansion foam used for fire suppression in the enclosed space]. *Vestnik MGSU — Proceedings of Moscow State University of Civil Engineering*, 2015, no. 2, pp. 85–92.
10. Korolchenko D. A., Sharovarnikov A. F., Byakov A. V. The analysis of oil suppression by aqueous film forming foam through a gas-salt layer of water. *Advanced Materials Research*, 2014, vol. 1073–1076, pp. 2353–2357. doi: 10.4028/www.scientific.net/amr.1073-1076.2353.
11. Korolchenko D. A., Sharovarnikov A. F. Heat balance of extinguishing process of flammable liquid by sprayed water. *Advanced Materials Research*, 2014, vol. 1070–1072, pp. 1794–1798. doi: 10.4028/www.scientific.net/amr.1070-1072.1794.
12. Sharovarnikov A. F., Korolchenko D. A. Ispolzovaniye generatorov peny vysokoy kratnosti dlya tusheniya pozharov v skladskikh pomeshcheniyakh [Usage of high-expansion foam generators for extinguishing fires in warehouses]. *Nauchnoye obozreniye — Science Review*, 2014, no. 9, part 2, pp. 461–466.
13. Sharovarnikov A. F., Korolchenko D. A. Fighting fires of carbon dioxide in the closed buildings. *Applied Mechanics and Materials*, 2013, vol. 475–476, pp. 1344–1350. doi: 10.4028/www.scientific.net/amm.475-476.1344.
14. Kholshchevnikov V. V. *Zakonomernost svyazi mezhdu parametrami lyudskikh potokov. Diplom No. 24-S na otkrytiye v oblasti sotsialnoy psikhologii* [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.
15. Kholshchevnikov V. V., Samoshin D. A., Istratov R. N. Issledovaniye problem obespecheniya pozharnoy bezopasnosti lyudey s narusheniyem zreniya, slukha i oporno-dvigatel'nogo apparata [The study of fire safety provision for people with seeing, hearing and moving disabilities]. *Pozharovzryvbezopasnost — Fire and Explosion Safety*, 2013, vol. 22, no. 3, pp. 48–56.
16. Isaevich I. I. *Razrabotka osnov mnogovariantnogo analiza planirovochnykh resheniy stantsiy i peresadochnykh uzlov metropolitena na osnove modelirovaniya dvizheniya lyudskikh potokov. Dis. kand. tekhn. nauk* [Development of the principles of multivariate analysis volumetric-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.
17. Parfenenko A. P. *Normirovaniye trebovaniy pozharnoy bezopasnosti k evakuatsionnym putyam i vykhodam v zdaniyakh detskikh doskolnykh obrazovatelnykh uchrezhdeniy. Dis. kand. tekhn. nauk* [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.
18. Kudrin I. S. *Vliyaniye parametrov dvizheniya lyudskikh potokov pri pozhare na obyemno-planirovochnyye resheniya vysoznykh zdaniy. Dis. kand. tekhn. nauk* [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., 2013. 190 p.
19. Istratov R. N. *Normirovaniye trebovaniy pozharnoy bezopasnosti k evakuatsionnym putyam i vykhodam v statsionarakh sotsialnykh uchrezhdeniy po obsluzhivaniyu grazhdan pozhilogo vozrasta. Dis. kand. tekhn. nauk* [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.
20. Belyaev S. V. *Evakuatsiya zdaniy massovogo naznacheniya* [Public evacuation from buildings]. Moscow, All-Russian Academy of the Architecture Publ., 1938. 72 p.

21. Fruin J. J. *Pedestrian planning and design*. New-York, Elevator World, 1971.
22. Kholshchevnikov V. V., Shields T. J., Samoshyn D. A. Foot traffic flows: background for modeling. In: Galea E. R. (ed.). *Proceedings of the Second International Conference on Pedestrian and Evacuation Dynamics*. University of Greenwich, 20–22 August 2003. London, U. K., University of Greenwich, 2003, p. 410.
23. Romm A. P. Ispolzovaniye kolichestvennykh metodov pri postroyenii sistemy peshekhodnykh putey v mikrorayone [Use of quantitative methods at creation of system of foot ways in the residential district]. *V pomoshch proyektirovshchiku-gradostroitel'yu. Vyp. 2. Matematicheskiye metody v gradostroitel'stve* [For the aid to the designer-town-planner. Issue 2. Mathematical methods in town planning]. Kiev, Budivelnik Publ., 1969, pp. 41–54.
24. *Methodical recommendations about design of pedestrian networks*. Moscow, TsNIIP gradostroitel'stva Publ., 1988 (in Russian).
25. Kholshchevnikov V. V., Ovsyannikov A. N. Zakonomernosti marshrutizatsii potokov v zritelnykh sooruzheniyakh [Regularities of routing of streams in visual constructions]. *Issledovaniya po funktsional'nym, fiziko-tekhnicheskim i esteticheskim problemam arkhitektury: sb. nauch. tr.* [Researches on functional, physics and technology and esthetic problems of architecture]. Tomsk, Tomsk State University Publ., 1988, pp. 131–140.
26. Issaevich I. The modeling of a person movement in free-planned locations of communal buildings. In: *Neue Technologien in Bauwesen. Proceedings of Russian-German Scientific Conference devoted to 10-years Cooperation of Ulyanovsk State Technical University and Darmstadt University of Applied Sciences*. Ulyanovsk, Ulyanovsk State Technical University Publ., 2008. 426 p.
27. Aybuev Z. S.-A. *Formirovaniye lyudskikh potokov na predzavodskikh territoriyakh krupnykh promyshlennyykh uzlov mashinostroitel'nogo profilya. Dis. kand. tekhn. nauk* [Formation of human streams in pre-factory 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.
28. Kholshchevnikov V. V. *Lyudskie potoki v zdaniyakh, sooruzheniyakh i na territorii ikh kompleksov. Dis. d-ra tekhn. nauk* [Human flows in buildings, structures and their adjoining territory. Dr. tech. sci. diss.]. Moscow, Moscow State University of Civil Engineering Publ., 1983. 442 p.
29. Sopelovskaya A. A. *Formirovaniye transportnykh i peshekhodnykh potokov v peresadochnykh uzlakh prigorodno-gorodskogo soobshcheniya. Dis. kand. tekhn. nauk* [Formation of transport and foot streams in transfer knots of the suburban and city message. Cand. tech. sci. diss.]. Moscow, Moscow State University of Civil Engineering Publ., 1980. 272 p.
30. Kholshchevnikov V. V. Raschet optimalnykh variantov peshekhodnykh putey v gorodskikh uzlakh [Calculation of optimum options of foot ways in city hubs]. *Na stroykakh Rossii — On Buildings of Russia*, 1983, no. 3, pp. 15–17.
31. Kholshchevnikov V. V., Levin Yu. P., Nikonov S. A. Raschet i modelirovaniye dvizheniya lyudskikh potokov [Calculation and modeling of the movement of human streams]. *Issledovaniya po osnovam arkhitekturnogo proyektirovaniya: sb. nauch. tr.* [Researches on bases of architectural design. Collected scientific papers]. Tomsk, Tomsk State University Publ., 1983, pp. 7–28.
32. Kholshchevnikov V. V., Aybuev Z. S.-A. *Stokhasticheskaya model dvizheniya lyudskogo potoka i yeye proverka pri funktsionirovaniy odnogo istochnika lyudskogo potoka* [Stochastic model of the movement of a human stream and its check when functioning one source of a human flow]. Moscow, VNIINTPI Publ., 1990, issue 3, deposit. no. 10447.
33. Kholshchevnikov V. V., Aybuev Z. S.-A. *Proverka modeli pri dlitelno-funktsioniruyushchikh istochnikakh* [Check of model at the long functioning sources]. Moscow, VNIINTPI Publ., 1990, issue 3, deposit. no. 10448.
34. Kholshchevnikov V. V., Aybuev Z. S.-A. *Razvitiye podkhoda k modelirovaniyu svobodnogo dvizheniya lyudskikh potokov* [Development of approach to modeling of the free movement of human flows]. Moscow, VNIINTPI Publ., 1990, issue 3, deposit. no. 10449.
35. Kholshchevnikov V. V., Aybuev Z. S.-A. *Opredeleniye statisticheskikh kharakteristik raspredeleniya veroyatnosti skorosti svobodnogo dvizheniya* [Definition of statistical characteristics of distribution of probability of speed of the free movement]. Moscow, VNIINTPI Publ., 1990, issue 3, deposit. no. 10450.
36. Shishov I. A., Kholshchevnikov V. V. *Program FMT 1.0. Certificate on the state registration of the computer program no. 2011614752 on 17.06.2011*. Moscow, Russian Federal Service for Intellectual Property Publ., 2011 (in Russian).
37. Kholshchevnikov V. V., Shishov I. A. Modelirovaniye svobodnogo dvizheniya lyudskikh potokov [Modeling of free movement of human flows]. *Vestnik Tomskogo gosudarstvennogo arkhitekturno-stroitel'nogo universiteta — Vestnik of Tomsk State University of Architecture and Building*, 2011, no. 2, pp. 89–103.

УДК 614.842.61

АНАЛИЗ ЭФФЕКТИВНОСТИ АВТОМАТИЧЕСКИХ АЭРОЗОЛЬНО-ПОРОШКОВЫХ СИСТЕМ ПОЖАРОТУШЕНИЯ НА КРУПНЫХ НЕФТЕГАЗОВЫХ ОБЪЕКТАХ

© В. А. ДЕВЯТКИН, профессор, заведующий кафедрой

“Проектирование и производство автоматических машин” (ППАМ);

© С. Ю. СЕРЕБРЕННИКОВ, д-р техн. наук, профессор кафедры ППАМ;

© С. В. ЧЕРНОВ, аспирант;

Пермский национальный исследовательский политехнический университет
(Россия, 614990, Пермский край, г. Пермь-ГСП, Комсомольский просп., 29)

Выявлены серьезные недостатки противопожарных систем на основе хладонов и модулей жидкой углекислоты. Обоснована высокая эффективность и экономическая целесообразность защиты крупных газокomppressorных и нефтенасосных станций от объемных пожаров быстродействующими установками аэрозольно-порошкового пожаротушения.

Ключевые слова: пожаротушение; нефтегазовые объекты; установки аэрозольно-порошкового пожаротушения; объемный пожар; эффективность тушения.

Традиционно для борьбы с объемными пожарами, вызванными высоконапорными факелами транспортируемых углеводородов, применяют газовые системы с использованием в основном хладонов и диоксида углерода CO_2 , а также стремятся сократить время технологической отсечки аварийных трубопроводов. Эти меры дают некоторый эффект только на небольших по объему газокomppressorных (ГКС) и нефтенасосных (ННС) станциях.

Однако обеспечить защиту более крупных объектов от быстроразвивающихся объемных пожаров газовые системы не в состоянии по ряду причин:

- эффект газового тушения практически сводится к нулю в случае дефлаграционного взрыва (произошел “хлопок”) и вскрытия на объекте легкобрасываемых элементов конструкции;
- хладоны и углекислота относятся к тяжелым газам (в 1,5...4 раза тяжелее воздуха), поэтому заполнение ими помещения до пожаротушающей концентрации начинается с нижних объемов ГКС;
- время подачи газов по длинным разветвленным газопроводам с учетом их большой плотности и значительной массы, требуемой для заполнения всего объема станции, может достигать нескольких минут, а верхних — до 10...15 мин, что зачастую ведет к прогару и обрушению кровли.

Особо следует остановиться на проблемах применения для защиты ГКС модулей изотермической жидкой углекислоты (МИЖУ), интенсивно внедряемых Газпромом. В первую очередь, настораживает их чрезмерная дороговизна, конструктивная и эксплуатационная сложность и, как следствие, низкая надежность.

Как известно, углекислота имеет способность переходить не только в газообразное, но и в твердое состояние при определенных условиях транспортировки по холодным трубам на наружных участках и объекте. Происходит так называемое “зашуговывание”, т. е. забивание труб снежной массой [1]. Разработчики МИЖУ обращают внимание проектировщиков и монтажников на необходимость точной трассировки труб по узлам стыковки и углам наклона к горизонту во избежание их закупорки. Все это свидетельствует о низкой надежности МИЖУ, большой инерционности и целесообразности использования CO_2 на крупных объектах только для локального тушения [2, 3].

Решить проблему защиты крупных объектов Газпрома и нефтетранспортных компаний вполне можно с использованием разработок конверсионных предприятий ВПК России, к которым можно отнести созданные еще в середине 1990-х годов быстродействующие, высоконадежные аэрозольные и аэрозольно-порошковые противопожарные системы, не требующие обслуживания в течение 10 лет при температурах хранения и эксплуатации +50...–50 °С.

Среди этих разработок выделяются генераторы холодного огнегасящего аэрозоля (ГОА) АГАТ-2А и аэрозольно-порошковые модули ОПАН-100 во взрывозащищенном исполнении, разработанные ООО “ИВЦ Техномаш” и изготавливаемые в ОКБ “Темп” Пермского национального исследовательского политехнического университета. Конструкция этих установок позволяет размещать их внутри взрывопожароопасных объектов и без трубной разводки за 15...20 с полностью заполнять, начиная с верхних объемов, практически любое по объему поме-



Примеры компоновки модулей ОПАН-100 и ГОА АГАТ-2А-180 на ГКС АО «Сибур-Тюменьгаз» объемом 3860 м³ (2012 г.)

щение газообразным аэрозолем или аэрозольно-порошковой смесью, имеющими низкую плотность (легче воздуха) и эффективную объемную пожаротушащую концентрацию в 6...10 раз меньше, чем у хладонов и CO₂.

По мнению разработчиков, особенно эффективно применение генераторов АГАТ-2А и ОПАН-100 для защиты крупных газонефтеперекачивающих станций объемом более 3000 м³ от быстроразвивающихся объемных пожаров, вызванных высоконапорными газовыми и маслонефтераспыленными факелами.

Проведенные по известным методикам аэрозольных систем [4] расчеты показали, что, например, для защиты ГКС объемом 4000 м³ необходимо 350 кг аэрозоля, производимого генераторами АГАТ-2-180. Исходя из того что в одном генераторе содержится 10 кг аэрозолеобразующего состава, потребуется установка 35 генераторов. Время срабатывания одного генератора АГАТ — 12 с. Проверочный расчет, определяющий избыточное давление при быстром заполнении аэрозолем замкнутого объема [4, см. прил. Л], показал, что максимальное избыточное давление в объеме ГКС не превышает допустимых значений даже при одновременном включении всех 35 генераторов. Следовательно, общее время заполнения и создания пожаротушащей концентрации во всем объеме станции не будет превышать 12–15 с. Причем прежде всего будут заполнены (а следовательно, защищены) верхние объемы помещения, что обеспечит защиту ГКС или ННС от обрушения кровли.

Для защиты такого же объема аэрозольно-порошковыми установками ОПАН-100 потребуется 36 модулей, содержащих 2880 кг порошка и 43 кг аэрозоля. Заполнение ГКС также начнется с верхних объемов, так как аэрозольно-порошковая смесь, подогретая до 40...50 °С, легче воздуха и выбрасывается через разгонные сопла Лавала со скоростью до 200 м/с непосредственно в припотолочный объем, а затем уже заполняет все помещение. Разгонные сопла примерно половины модулей могут направляться в средние и нижние объемы для защиты оборудования станции при ее частичной разгерметизации, например после дефлаграционного взрыва. Общее время создания пожаротушащей концентрации в объеме 4000 м³ не превысит 20...25 с (время срабатывания одного модуля ОПАН-100). Включение 36 модулей может производиться одновременно, так как порошок не повышает давление внутри ГКС.

Для сравнения, для полной защиты (заполнения) ГКС объемом 4000 м³ с помощью МИЖУ потребуется 2,8 т углекислоты и 8...10 мин.

Стоимость модуля изотермического жидкой углекислоты РИП-6/22 с двойным запасом CO₂ (5,6 т — обязательное требование для ГКС) составит не менее 13 млн. руб. Аэрозольная система из 35 генераторов АГАТ-2А с учетом монтажа стоит 0,9 млн. руб. Примерно столько же будет стоить система, включающая 36 порошковых модулей ОПАН-100. Таким образом, стоимость комбинированной аэрозольно-порошковой системы для защиты ГКС объемом 4000 м³ будет в 7,2 раза меньше. Подробно экономические расчеты для различных систем защиты укрытия объемом 3860 м³ ГКС АО «СибурТюменьгаз» приведены в работе [5]. Примерная компоновка модулей ОПАН-100 и генераторов АГАТ-2А показана на рисунке.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Копылов Н. П. Применение автоматических углекислотных установок низкого давления — перспективное направление в противопожарной защите больших объемов производственных помещений // Пожарная автоматика : каталог. — 2009. — С. 58–64.
2. Тагиев Р. М. Концепция обеспечения пожарной безопасности объектов ОАО «ГАЗПРОМ» // Средства спасения. Противопожарная защита : каталог. М. : РИА «Индустрия безопасности», 2007. — С. 64–65.
3. Серебренников С. Ю. Аварийные системы с газогенераторами и двигателями на твердом топливе (Теория и эксперимент). — Екатеринбург : УрО РАН, 2002. — 286 с.
4. СП 5.13130.2009. Системы противопожарной защиты. Установки пожарной сигнализации и пожаротушения автоматические. Нормы и правила проектирования : приказ МЧС России от 25.03.2009 № 175; введ. 01.05.2009. — М. : ФГУ ВНИИПО МЧС России, 2009.
5. Прохоренко К. В., Серебренников С. Ю. и др. Сравнительная оценка систем пожаротушения газоперекачивающих агрегатов // Сфера Нефтегаз. — 2011. — № 3. — С. 130–134.

**ВОПРОС:**

В последней редакции “Технического регламента о требованиях пожарной безопасности” (Федеральный закон от 23.06. 2014 г. № 123-ФЗ) [1], вступающей в силу 13.07.2015 г., будет исключен п. 11 ст. 82, в котором отмечено, что пожарозащищенное электрооборудование (IP) не допускается использовать во взрыво- и взрывопожароопасных помещениях. С отменой данного пункта возникает вопрос: допускается ли использовать IP-оборудование во взрывоопасных зонах?

Такая возможность существовала в требованиях “Правил устройства электроустановок” (ПУЭ, 6-е изд.) [2]. Например, согласно табл. 7.3.10 ПУЭ для зоны В-Иб допускается использовать электрооборудование без средств взрывозащиты с оболочкой не менее IP44 (или IP54). Не снижает ли отмена п. 11 ст. 82 требований к выбору и применению пожаро- и взрывозащищенного оборудования?

ОТВЕТ:

Указанные выше вопросы уже частично освещались в данной рубрике журнала, № 12 за 2013 г.

Использование согласно ПУЭ IP-оборудования в отдельных классах взрывоопасных зон было вызвано отсутствием массового производства в СССР отдельных видов электроизделий, поэтому было принято решение о допустимости использования IP-оборудования до появления достаточного количества взрывозащищенного. Данные особенности применения IP-оборудования планировалось учесть в гл. 7.3 ПУЭ 7-го изд., но этого так и не было сделано.

Выбор оборудования для работы во взрывоопасных зонах в первую очередь должен осуществляться не по ФЗ-123 [1] и ПУЭ [2], а по Техническому регламенту Таможенного союза (ТР ТС 012/2011) [3].

Опираясь на требования международных (ГОСТ IEC 60079–14) и национальных (ГОСТ 30852.13) стандартов можно говорить также о том, что оборудование, установленное во взрывоопасной зоне, должно иметь определенный уровень взрывозащиты, вид, подгруппу и температурный класс, в том числе защиту оболочки IP.

Кроме того, в п. 5.2.3 ГОСТ 30852.13–2002 (МЭК 60079-14:1996) [4] отмечается, что только для взрывоопасной зоны класса 2 можно использовать электрооборудование:

- сконструированное специально для использования во взрывоопасной зоне класса 2 (например, оборудование вида “n”);
- соответствующее требованиям конкретного стандарта для определенного вида электрооборудования, в котором при нормальной работе нагретые поверхности не способны воспламенить взрывоопасную смесь и не должно возникать дуговых или иск-

ровых разрядов. Если же возникновение таких разрядов возможно, то электрические параметры цепей не должны превышать значений, установленных в ГОСТ 30852.10 (МЭК 60079-11:1999), с коэффициентом безопасности, равным 1. При этом выбор параметров должен проводиться в соответствии с требованиями ГОСТ 30852.14–2002 для искробезопасных цепей с защитой вида “n”;

- заключенное в оболочку со степенью защиты (код IP) и механической прочностью не ниже, чем у электрооборудования, предназначенного для применения в невзрывоопасной зоне с аналогичными условиями окружающей среды.

Для остальных взрывоопасных зон классов 0 и 1 допускается использовать оборудование только с конкретными видами защиты, обеспечивающими безопасную работу в указанных зонах.

Оценка параметров и свойств электрооборудования в обязательном порядке выполняется аккредитованными испытательными организациями. Из этого следует, что отмена п. 11 ст. 82 ФЗ-123 [1] является вполне логичной и не снижает требований к выбору и применению пожаро- и взрывозащищенного оборудования, так как использование IP-оборудования без дополнительных средств взрывозащиты во взрывоопасных зонах недопустимо, а значит, запрет на применение в них пожарозащищенного оборудования является обоснованным.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Технический регламент о требованиях пожарной безопасности (в ред. от 23.06.2014) : Федер. закон РФ от 22.07.2008 № 123-ФЗ; принят Гос. Думой 04.07.2008; одобр. Сов. Федерации 11.07.2008 // Собр. законодательства РФ. — 2008. — № 30 (ч. I), ст. 3579.
2. Правила устройства электроустановок (ПУЭ). — 6-е изд. — М. : Энергоатомиздат, 1986.
3. ТР ТС 012/2011. Технический регламент Таможенного союза. О безопасности оборудования для работы во взрывоопасных средах (в ред. от 13.05.2014) : утв. решением Комиссии Таможенного союза от 18.10.2011 № 825; введ. 15.02.2013. URL : www.tsouz.ru (дата обращения: 03.06.2015).
4. ГОСТ 30852.13–2002 (МЭК 60079-14:1996). Электрооборудование взрывозащищенное. Часть 14. Электроустановки во взрывоопасных зонах (кроме подземных выработок) : введ. 15.02.2014. — М. : Стандартинформ, 2014.

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)

ПРАВИЛА ДЛЯ АВТОРОВ!

Направляемые в журнал “ПОЖАРОВЗРЫВОБЕЗОПАСНОСТЬ” статьи должны содержать результаты научных исследований и испытаний, описания новых технических устройств и программно-информационных продуктов, проблемные 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. В начале работы (например, во введении) целесообразно кратко изложить состояние проблемы и место в ней данной задачи. В конце публикации должны быть сделаны краткие выводы с указанием научной новизны и практической полезности материала.

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.

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 информативными; в них можно использовать только общепринятые сокращения. В переводе заглавий статей на английский язык недопустимы транслитерации с русского языка, кроме непереводаемых названий собственных имен, приборов и других объектов, имеющих собственные названия, а также непереводаемый 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 (не менее 4–5 предложений).

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);
- “англоязычным” (написанным качественным английским языком, без использования программ автоматизированного перевода);
- объем текста авторского резюме должен быть не менее 150–200 слов.

Приветствуется 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 общеупотребительных, следует применять в исключительных случаях или давать 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.

2.7. Текст статьи. Текст 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. Пристатейные 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 требования будет свидетельствовать о том, что авторы используют предыдущие научные достижения в необходимой мере.

Не менее половины источников должны быть включены в один из ведущих индексов цитирования: Российский индекс научного цитирования eLibrary, Web of Science, Scopus, Chemical Abstracts, MathSciNet, Springer и др. В случае присвоения публикации цифрового идентификатора объекта (DOI) его необходимо указать, что позволит однозначно идентифицировать объект в базах данных.

Состав источников должен быть актуальным и содержать не менее 5 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.

Следует обратить внимание на публикации диссертаций (особенно докторских), защищенных в последние годы по ближайшей научной специальности или группе специальностей. Для поиска рекомендуется использовать ресурс <http://www.disserscat.com>.

2.9. References (пристатейные списки литературы в транслитерации (на латинице) и на английском языке). Представление в References только транслитерированного (без перевода) описания недопустимо.

При переводе русскоязычного источника (книги, монографии, диссертации, электронного ресурса и пр.) приводится транслитерация фамилий и инициалов авторов, транслитерация названия источника и в квадратных скобках его перевод на английский язык, год, место издания, название издательства, количество страниц. Место издания должно быть указано на английском языке (Moscow, Saint Petersburg и т. п.). Транслитерированное название издания выделяется курсивом.

Если приводится русскоязычная статья в журнале, то, помимо транслитерации названия статьи и его перевода на английский язык, указанного в квадратных скобках, необходимо дать официальную английскую версию названия журнала (перевод обычно есть на сайте журнала). Если ее нет, то приводится обычная транслитерация. Указывается также год издания, том, номер выпуска, страницы статьи. Название издания выделяется курсивом.

Примеры описаний в References можно найти на сайте издательства (www.fire-smi.ru).

На сайте издательства Emerald даны достаточно подробные рекомендации по составлению пристатейных списков литературы по стандарту Harvard (Harvard Reference System) практически для всех видов публикаций (<http://www.emeraldinsight.com/authors/guides/write/harvard.htm?part=2>), а также программные средства для их формирования.

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

ООО «ИЗДАТЕЛЬСТВО «ПОЖНАУКА»

ПРЕДЛАГАЕТ ВАШЕМУ ВНИМАНИЮ

Г. И. Смелков, В. Н. Черкасов,
В. Н. Веревкин, В. А. Пехотилов, А. И. Рябилов

ЭЛЕКТРОУСТАНОВКИ

во взрывопожароопасных зонах

Справочное пособие

М.: ООО «Издательство «Пожнаука», 2012. – 222 с.



Приводятся новые, отвечающие современной нормативной базе, требования по классификации горючих смесей и пожаровзрывоопасных зон; рекомендации по выбору и использованию оборудования, включая кабельные изделия во взрывопожароопасных зонах.

Издание предназначено для инженерно-технических работников, занимающихся проектированием и монтажом электроустановок, работников пожарной охраны и специалистов широкого профиля в качестве учебного пособия для подготовки и повышения квалификации в области пожаровзрывобезопасности электроустановок.

УВАЖАЕМЫЕ ЧИТАТЕЛИ!

Издательство “ПОЖНАУКА” предлагает Вам оформить подписку на журнал “Пожаровзрывобезопасность” на 2-е полугодие 2015 г., а также годовую подписку.

ПЕРСОНАЛЬНАЯ ПОДПИСКА
на журнал

**ПОЖАРОВЗРЫВО-
БЕЗОПАСНОСТЬ**



ISSN 0869-7493

КУПОН '2015

Издание	Цена подписки, руб.	Количество экземпляров	Стоимость подписки, руб.
Журнал “Пожаровзрывобезопасность” (2-е полугодие 2015 г.)	5700		
Журнал “Пожаровзрывобезопасность” (годовая подписка)	10400		

Для соискателей ученой степени кандидата
и доктора наук действуют особые условия подписки!

**По вопросам подписки просьба
обращаться по телефонам
(495) 228-09-03, 8-909-940-01-85**

ПОДПИСКА ОСУЩЕСТВЛЯЕТСЯ:

через ООО “Издательство “Пожнаука”;
через агентство “РОСПЕЧАТЬ”,
индекс 81913 (полугодовой), 70753 (годовой);
через агентство “АПР”,
индекс 83647 (полугодовой), 90121 (годовой)
(в любом почтовом отделении в каталоге
“Газеты и журналы”);

через подписные агентства:
ООО “Урал-Пресс”, ООО “Информнаука”,
ЗАО “МК-ПЕРИОДИКА”



ИНСТИТУТ КОМПЛЕКСНОЙ БЕЗОПАСНОСТИ В СТРОИТЕЛЬСТВЕ

Московский государственный
строительный университет

Аттестат аккредитации № РОСС RU.0001.21AM09 от 24.06.2014 г.



Научно-исследовательские
и сертификационные
испытания:

- ♦ строительных материалов;
- ♦ строительных конструкций;
- ♦ огнезащитных составов;
- ♦ кабельных изделий;
- ♦ пенообразователей;
- ♦ фасадных систем.

Контакты:

Тел.: (495) 662-69-70

e-mail: ikbs@mgsu.ru

www.ikbs-mgsu.ru